文部省検定済教科書 | 7 実教 | 工業 179 |

電気技術 I A

改訂版

実教出版

電気用図記号

名　称	図　記　号
I．基本図記号	
抵　抗 抵抗器 （下：可変の場合）	
インダクタンス 巻　線 コイル	
静電容量 コンデンサ （右：可変の場合）	
電　池 直流電源 （右：可変電圧の場合）	
交流電源	
開閉器	
力率計	cos φ
放電ギャップ 静電放電器	
避雷器	
ヒューズ	
ランプ	

名　称	図　記　号
II．電力用図記号	
直流永久磁石電動機（単線図用） （右：発電機（複線図用））	M　G
直流他励電動機 （単線図用） （右：発電機（複線図用），下：端子・ブラシを表示する場合）	M　G　M
誘導電動機 （かご形） （下：巻線形） （右の複線図用は巻線が△接続の場合）	M　M　M　M
同期電動機（単線図用） （右：同期発電機（複線図用））	MS　GS
同期調相機 （複線図用）	CS
単相変圧器 （2巻線） （単線図用）	
三相変圧器 （2巻線） （人△接続） （単線図用）	
三相変圧器 （3巻線） （人人△接続） （単線図用）	

名　称	図　記　号
単相計器用変圧器（2巻線）（単線図用）（右：複線図用）	
変流器	
計器用変圧変流器（単線図用）	
零相変流器（単線図用）	
電圧計切換開閉器（単線図用）	
電流計切換開閉器（単線図用）	
断路器（右：単線図用）	
ヒューズ付き断路器	
気中遮断器 配線用遮断器（単線図用）	
電力用コンデンサ 進相コンデンサ（単線図用）	
ケーブルヘッド（単線図用）	

名　称	図　記　号
交流遮断器（単線図用）（右：引外しコイル付き（複線図用））	
ナイフスイッチ（単線図用）（右：複線図用）	
整流素子	
サイリスタ	
整流器（右：サイリスタ使用の場合）	
順変換装置	
逆変換装置 インバータ	
周波数変換装置	

III．電気通信用図記号

名　称	図　記　号
一方向性降伏ダイオード 定電圧ダイオード	
3極サイリスタ	
光電池	
ホール素子（四つの抵抗性接続をもつ場合）	

（JIS C 0301－1982）

平成元年３月31日　文部省検定済　高等学校工業科用

電気技術ⅠA

改訂版

宮入庄太

実教出版株式会社

監修

所属	氏名
東京工業大学名誉教授 東京電機大学教授 工学博士	宮入庄太
東京工業大学名誉教授 電気通信大学教授 工学博士	林　泉

編修

所属	氏名
元東京都立本所 工業高等学校長	緒方興助
東京都立本所 工業高等学校教頭	新井芳明
元東京工業大学助教授 工学博士	海老塚佳衛
元東京都立練馬 工業高等学校教諭	鬼塚新一
東京都立町田 工業高等学校教諭	熊谷文宏
元東京都立杉並 工業高等学校教頭	久米健一
東京都立小石川 工業高等学校教諭	菅谷光雄
東京都立八王子 工業高等学校教諭	高野雄三郎
東京都立小金井 工業高等学校教諭	高橋日吉
東京工業大学助教授 工学博士	高橋亮一
東京都立北豊島 工業高等学校教諭	柄本治利
元東京工業大学付属 工業高等学校副校長	馬場秀三郎
東京都立町田 工業高等学校教諭	平井喜之
元東京工業大学付属 工業高等学校教諭	藤縄英作

協力

所属	氏名
名古屋市立 工業高等学校教諭	太田照男
兵庫県立兵庫 工業高等学校教諭	佐伯　堯
東京都立練馬 工業高等学校教諭	多田正美
神戸市立御影 工業高等学校教諭	中村喬一
東京都立小金井 工業高等学校教諭	保坂尚光
愛知県立名南 工業高等学校教諭	山内道男
元兵庫県立兵庫 工業高等学校長	渡辺次郎

目　次

第1章　直　流　機

第2章　電　気　材　料

第3章 変 圧 器

第4章 誘 導 機

第5章　同　期　機

第6章 小形電動機

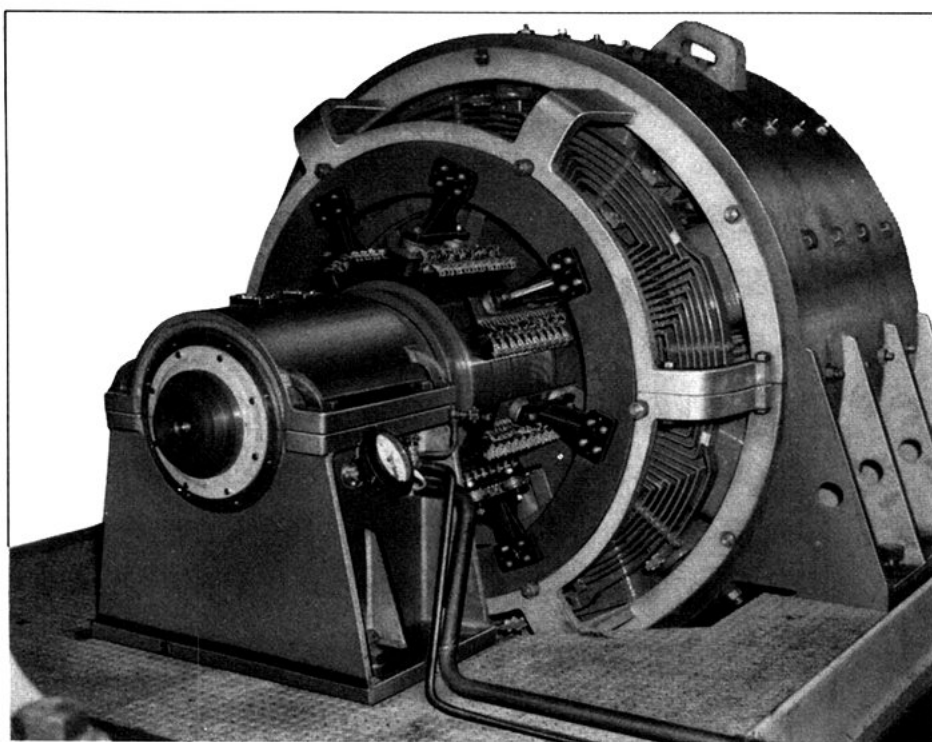
第7章 半導体電力変換装置

「電気技術IB」目次

第1章

直流機

磁界の方向と垂直に置いた導体を磁界および導体の方向と垂直に動かすと，導体には起電力が生じる。この現象を用いて直流電力を発生するようにした装置が，直流発電機である。また，この導体に直流を流すと，導体には力が働く。この現象を用いて動力を発生するようにした装置が，直流電動機である。これらの電気機器をまとめて直流機という。

この章では，直流機の構造・特性・用途について調べる。

直流電動機　定格出力1700 [kW]，極数 8，最低回転速度225 [rpm]，最高回転速度560 [rpm]，定格電圧750 [V]，定格電流2400 [A]

1 直流発電機

この節の目標　磁界中の導体を運動させて起電力を生じさせ，一定の電圧を連続的に発生させ，直流の電圧や電流を取り出せるようにするためには，いろいろな工夫(くふう)が必要である。直流発電機は，磁界中の導体を回転させて，滑らかな直流電圧を取り出せるようにした装置である。

ここでは，直流発電機の構造・種類・特性・用途などについて調べる。

1. 直流発電機の原理と構造

（1） 直流電圧の発生

図1(a)に示すように，永久磁石の磁極の間に方形コイルを置き，XX' を軸として，矢印の向き（時計回り）に周速度 u [m/s] で回転させる。このとき，コイルの回転軸の方向の長さを l [m]，平等磁界の磁束密度を B [T]，磁界に垂直な面に対して，コイルの面がなす角度を θ [rad] とすると，すでに学んだように，コイルに誘導される起電力 e [V]は，$e=2\,Blu\sin\theta$ で表される。

コイルの両端は，絶縁された半円状の二つの導体 C_1，C_2 に接続され，コイルとともに回転する。C_1，C_2 の間には，固定したブラシ* B_1，B_2 が接触していて，コイルに発生した起電力 e [V] によって抵抗 R [Ω] に電流 i [A] が流れ，R [Ω] の両端に電圧 v [V] が生じる。このようにすれば，正弦波交流起電力がコイルに発生しても，

* 一般に黒鉛ブラシが用いられる。

(a) 直流電圧の発生　(b) 抵抗 R に生じる電圧

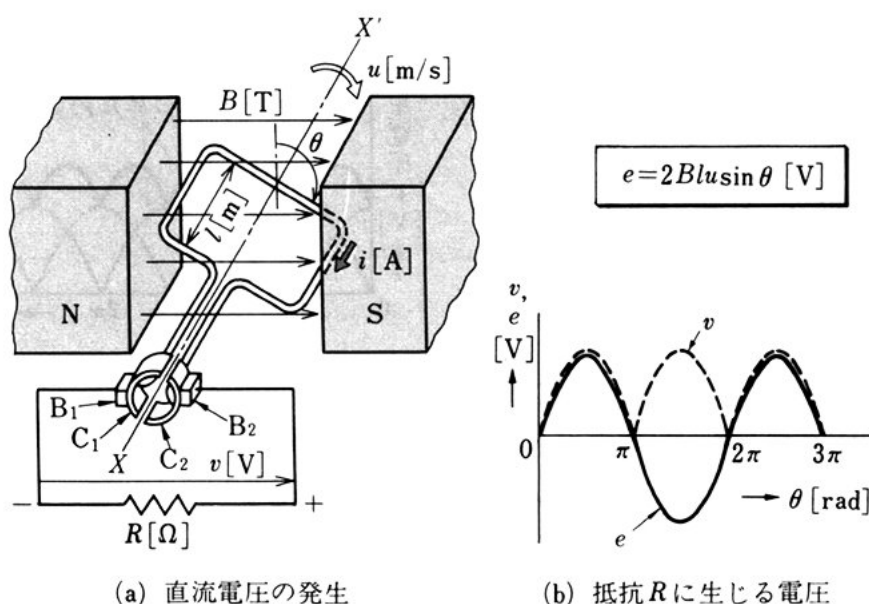



図 1 電 圧 の 発 生

抵抗 R [Ω] では，図(b)の破線のような同一の向きの電圧 v [V] が得られる。C_1 と C_2 は，このように，電圧の向きを同じにする働きをするので**整流子**とよばれ，それぞれの半円状の導体 C_1 および C_2 は，**整流子片**（実際はくさび形の硬銅製）とよばれる。

問 1. 図1(a)に示すように，コイルが回転している。コイルの長さ l が 0.4 [m]，周速度 u が 30 [m/s]，磁束密度 B が 0.1 [T] である。コイルの位置を示す角度 θ が $\frac{\pi}{2}$ [rad] のとき，このコイルに発生する起電力 e [V] はいくらか。

（2） 滑らかで大きな直流電圧を発生する方法

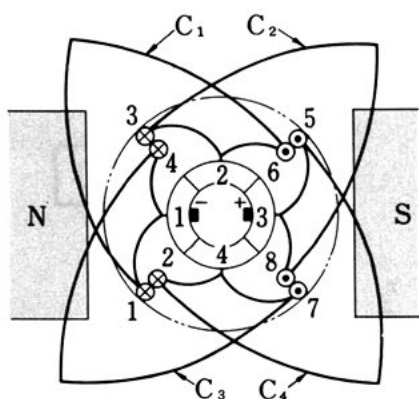
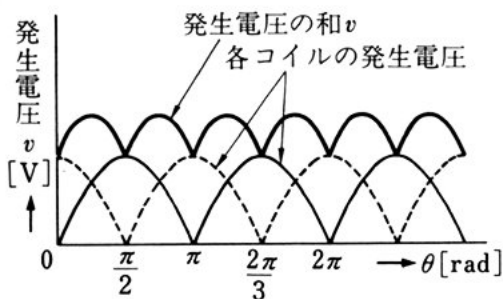
図1の場合には，コイルの数も整流子片の数も少ないので，発生電圧 v [V] の脈動は大きいが，コイルおよび整流子片の個数を増せば，脈動を小さくすることができる。図2(a)において，隣どうしのコイルの角度は $\frac{\pi}{2}$ [rad] であるから，それぞれの発生電圧は，図(b)の細線および破線で示すようになる。図(a)において，コイル C_1, C_2

(a) コイルが4個，整流子片が4個の場合

(b) コイルの発生電圧

図 2　滑らかな電圧を得る方法

およびC_4, C_3をそれぞれ直列につなぎ，これら二組のコイル群を並列にブラシ間につないでおけば，ブラシ間の発生電圧は，図(b)の太線で示したv [V] のようになり，脈動はかなり小さくなる。

実際の直流発電機では，円筒形の**電機子鉄心**に設けた多数の**スロット**とよばれる溝に，多数のコイルすなわち**電機子巻線**を配置し，それに応じて整流子片の数も多くしてある。このようにすれば，ブラシ間に発生する直流電圧は大きくなり，コイルの角度によって生じる脈動も互いに打ち消し合ってほとんどなくなる。また，**磁極**を図3に示すような形状にして，磁極間の磁束密度を大きくし，コイルの発生電圧を高くしている。

電機子鉄心　磁極　N　磁極片　スロット

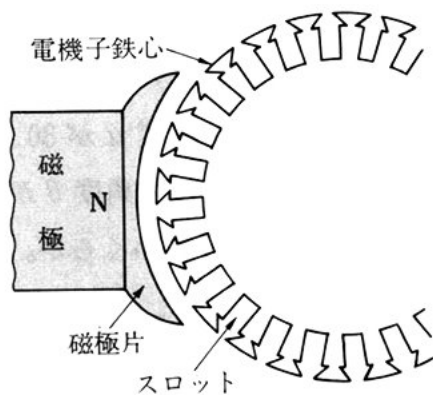



図 3　磁極と電機子鉄心

(3)　直流発電機の構造

直流発電機は，磁束を作る磁極の部分である界磁，回転して起電力を発生する巻線の部分である電機子，磁極をつなぐ継鉄などからできている。

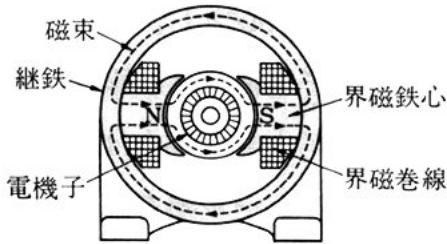



図 4 磁 極 と 継 鉄

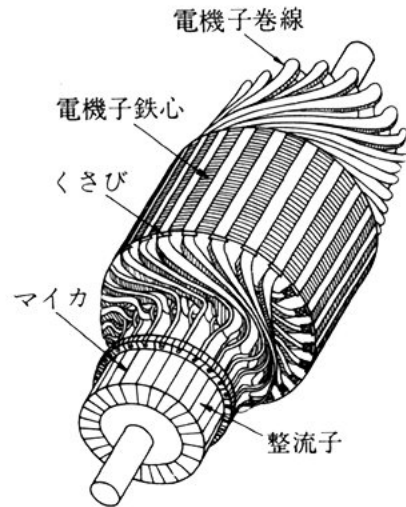



図 5 電機子の構造

図 6 電 機 子 巻 線

界磁は，図 4 に示すように，**界磁鉄心**に**界磁巻線***を施し，これに直流すなわち**界磁電流**を流して，界磁と電機子の間のギャップに発電に必要な磁束を発生させる。界磁鉄心は，厚さ 0.8～1.6 [mm] の軟鋼板を積み重ねてリベットでとめ，ボルトで継鉄に取り付ける。

継鉄は，磁束の通路となるばかりでなく，機械の外枠を形作るもので，鋳鉄または厚い軟鋼板を円筒形に曲げて作る。

電機子は，図 5 に示すように，電機子鉄心・整流子片および電機

* 電気機器の巻線としては，絶縁被覆した軟銅線が多く使われる。

子巻線によって構成されている。電機子鉄心は，磁束の大きさと向きが周期的に変化する**交番磁束***が通るから，厚さ 0.35 [mm] または 0.5 [mm] のけい素鋼板を層状に重ねた**成層鉄心**とし，その外周に巻線を収めるスロットが設けてある。電機子巻線には軟銅線が用いられ，その断面が円形のものが多い。電流が大きな場合は，断面が長方形の平角線を用いたり，巻線に生じるジュール熱を減らすために，図6に示すように，4本の導線に分けて並列にすることがある。電機子巻線は，図6に示すように，六角形に巻かれたものを用い，コイル辺がスロットの中に収められる。例えば，図7(a)に示すように，電機子のスロットに配置する。この場合，巻線の導体数は4で，辺数は16である。このようすを平面的に展開したものが展開図であり，図(b)のように表す。また，回路図で表すと，各コイル辺は，図(c)のように二つの分路からなる並列回路になっている。整流子は，図5のように，電機子巻線を硬銅製の整流子片に接続し，マイカをはさんで絶縁した整流子片を円筒形に配置し，全体を金具で締め付けて軸に取り付けられる。

磁気的中性点　図7(b)において，太線の巻線は，ブラシ－Bで短絡されている。しかし，この巻線は，ちょうど磁極N，Sが変わる場所，すなわち**磁気的中性点**にあり，起電力が誘導されないので，短絡電流は流れない。ブラシ＋Bにおいても同様である。ブラシの位置を決めるときには，磁気的中性点に注意しなければならない。

（4）直流発電機の例

図8は，直流発電機の例である。電機子鉄心・電機子巻線・整流子は，回転軸に取り付けられており，軸は，軸受で支えられている。

*　交流によって生じる磁束。

(a) 電機子巻線

電機子巻線　磁極　回転の向き

1～16はコイル辺番号

1～8は整流子片番号

整流子片　−B　ブラシ　+B

磁極はコイルの手前側にある。

(b) 展開図

1～16はコイル辺番号

1～8は整流子片番号

→は誘導起電力の向き

(c) 電機子内部回路図

図 7 巻線法の例

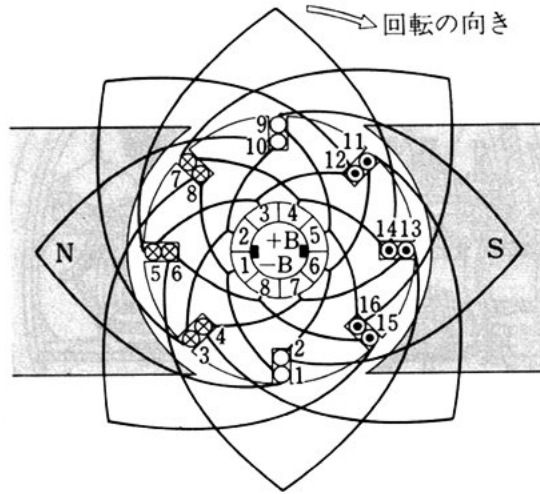
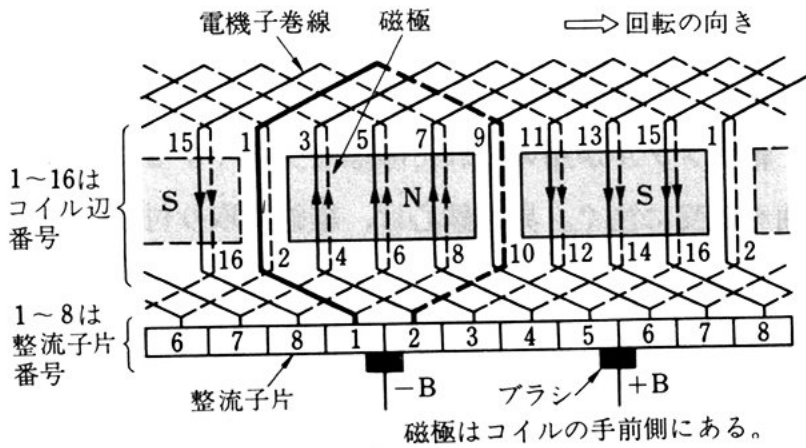
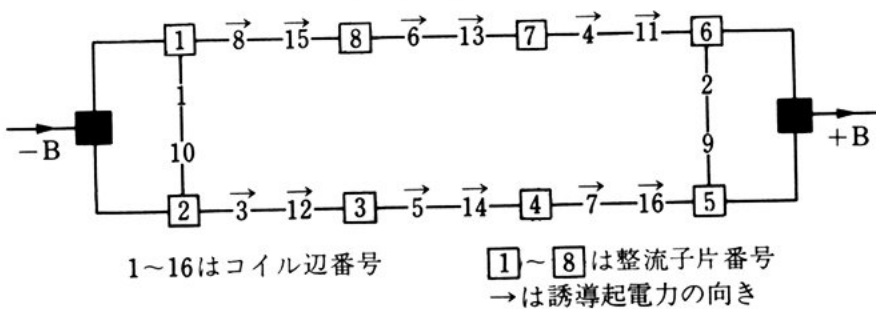
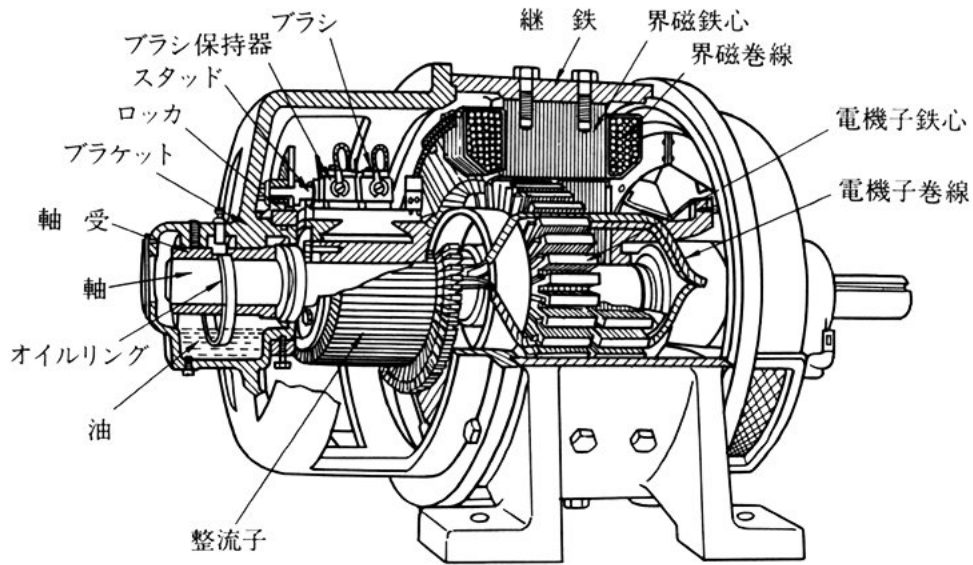



図 8　直流発電機の構造

軸受はブラケットで保持され，ブラケットは継鉄に固定されて，継鉄とともに発電機の外枠を構成している。

軸受には，軸受メタルが用いられ，摩擦を少なくするため，オイルリングで油を軸受に注ぐ。界磁鉄心は，継鉄に取り付けられ，界磁巻線が施されている。

ブラシはブラシ保持器に取り付けられ，ブラシ保持器はスタッドに取り付けられている。スタッドはロッカに取り付けられ，回転の向きに対するブラシ保持器の位置を調節し，固定することができる。ロッカはブラケットに取り付けられている。

2. 直流発電機の理論

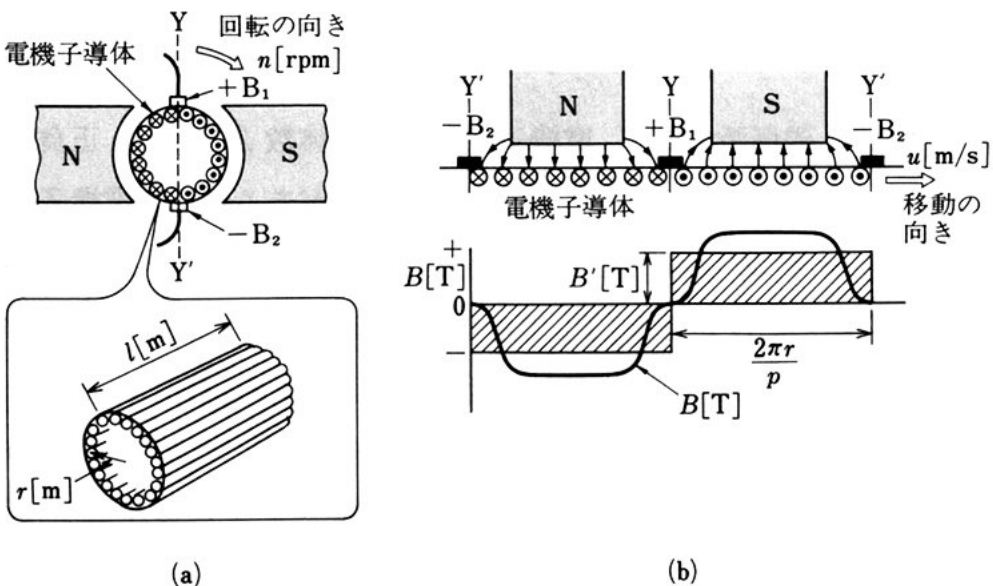
(1) 起電力の大きさ

図 9(a)の電機子導体が磁束を切ると，起電力が発生する。これを展開して示したものが図(b)である。磁極と電機子の間のエアギャップにおける磁束密度 B [T] は太線のようになるが，その平均磁束密度を B' [T]，電機子の半径を r [m]，1本の電機子導体の長さを l [m]，電機子導体の運動速度，すなわち周速度を u [m/s]，回転速度を n [rpm] とすると，1本の導体に誘導される起電力 e [V] は，次の式で表される。

$$e = B'lu = B'l\frac{2\pi rn}{60} \qquad (1)$$

一般に，電機子巻線の全導体数を Z，正負ブラシ間の並列回路の数を a とすると，発電機の起電力 E [V] は，次の式で表される。

図 9 電機子導体の磁束分布と起電力

(a)　　(b)

$$E=\frac{Z}{a}\times e=\frac{Z}{a}B'l\frac{2\pi rn}{60} \qquad (2)$$

1極から出る磁束を Φ [Wb]，極数 p（N極とS極の和で偶数）の場合，その磁束が通る電機子の表面積を A [m^2] とすると，磁束密度 B' は，次の式で表される。

$$B'=\frac{\Phi}{A}=\frac{\Phi}{\dfrac{2\pi rl}{p}}=\frac{p\Phi}{2\pi rl} \qquad (3)$$

式（2）に式（3）を代入すると，次の式が得られる。

$$E=\frac{p}{a}\Phi Z\frac{n}{60}=K\Phi n \qquad (4)$$

ただし，K は，$K=\dfrac{pZ}{60a}$ であって，発電機の構造から決まる定数である。したがって，直流発電機の起電力は回転速度と磁束の積に比例する。

端子電圧と起電力の関係　正負ブラシ間の電機子導体の抵抗を R_a [Ω]，電機子電流を I_a [A]，ブラシの接触による電圧降下を v_b [V] とすれば，直流発電機の端子電圧 V [V] と，起電力 E [V] との関係は，次の式で表される。

$$V=E-(R_aI_a+v_b) \qquad (5)$$

例題 1. 磁極数 p が 6，電機子巻線の全導体数 Z が 400，正負ブラシ間の並列回路数 a が 4 の直流発電機がある。この電機子の直径 $2r$ が 30 [cm]，軸方向の長さ l が 40 [cm]，ギャップの平均磁束密度 B が 0.5 [T] である。1500 [rpm] で回転させるときに誘導される起電力 E [V] はいくらか。また，負荷電流 I_a を 30 [A] 流したときの端子電圧 V [V] を求めよ。ただし，電機子巻線の抵抗 R_a は 0.12 [Ω]，ブラシの接触による電圧降下 v_b は 1 [V] とする。

解答 起電力 E [V] は，式 (2) から，

$$E=\frac{Z}{a}B'l\frac{2\pi rn}{60}=\frac{400}{4}\times0.5\times0.4\times\frac{2\pi\times0.15\times1500}{60}=471\ [\mathrm{V}]^{*}$$

である。また，端子電圧 V [V] は，式 (5) から，

$$V=E-(R_aI_a+v_b)=471-(0.12\times30+1)=466\ [\mathrm{V}]$$

となる。

(2) 電機子反作用

直流発電機に負荷をつないで電機子巻線に電流を流すと，電機子電流によって電機子周辺に磁束を生じ，界磁電流による磁束，すなわち**界磁磁束**の分布が乱される。この電機子電流による働きを**電機子反作用**という。電機子反作用によって，発電機の起電力が減少したり，磁束密度が 0 [T] となる位置，すなわち中性軸が移動したりする。

電機子電流の影響　図 10 (a) は，2 極の発電機において，磁極と電機子の間のエアギャップでの界磁磁束の分布図である。図 (b) は，界磁磁束を考えずに，電機子電流が流れたときの磁束の分布図である。そこで，負荷運転中のエアギャップの磁束分布は，図 (a) と図 (b) の磁束が合成され，図 (c) に示すようになるから，磁気的中性点は回転の向きに角度 θ [rad] だけ偏る。これを**偏磁作用**という。

この偏磁作用があると，ブラシの位置が図 (c) のままでは，このブラシで短絡される電機子巻線に起電力が誘導され，短絡電流が流れるので，ブラシと整流子片間に火花が生じるようになる。

---

* 測定値は一般に誤差を含んでいる。したがって，有効数字のけた数を多く並べても正確とはいえず，意味がない。この教科書では，測定値や近似値の計算の結果は，原則として有効数字 3 けたで示すこととした。

$e=Bl\frac{2\pi rn}{60}$

$E=\frac{Z}{a}\times e$

(a) 界磁電流による磁束分布

(b) 電機子電流による磁束分布

(c) 負荷状態の合成磁束分布

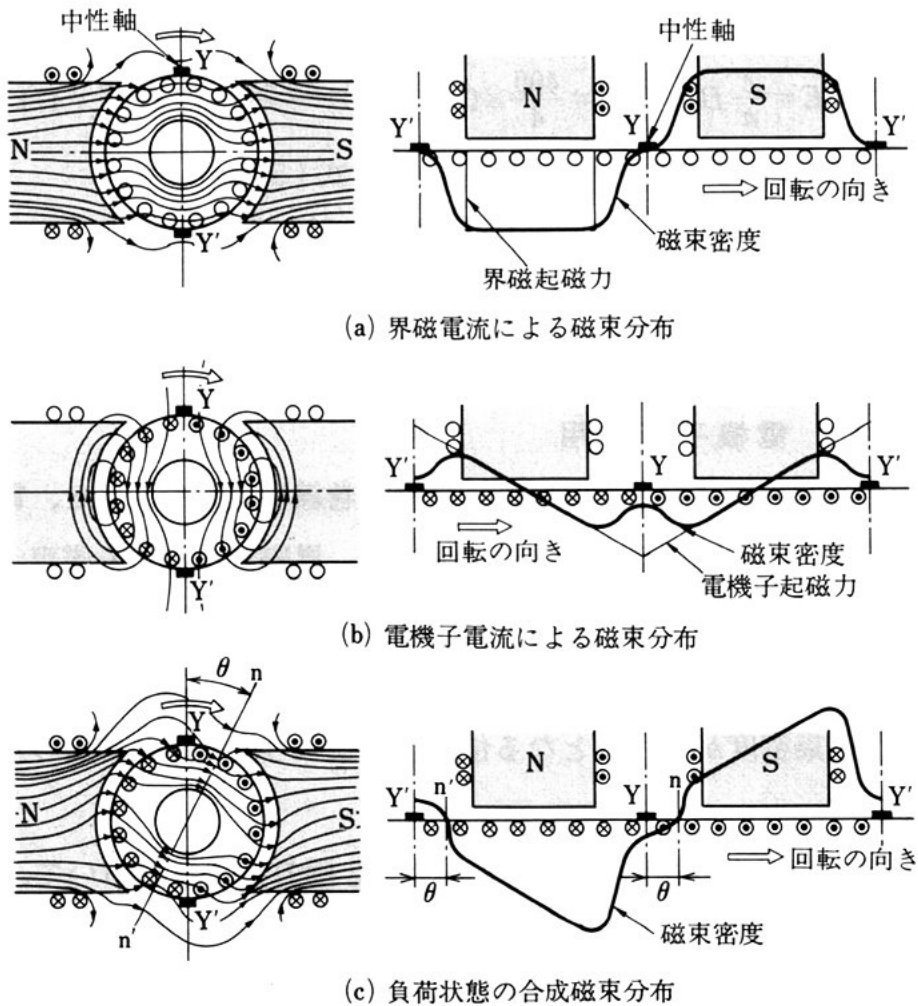



図 10　発電機の磁束分布

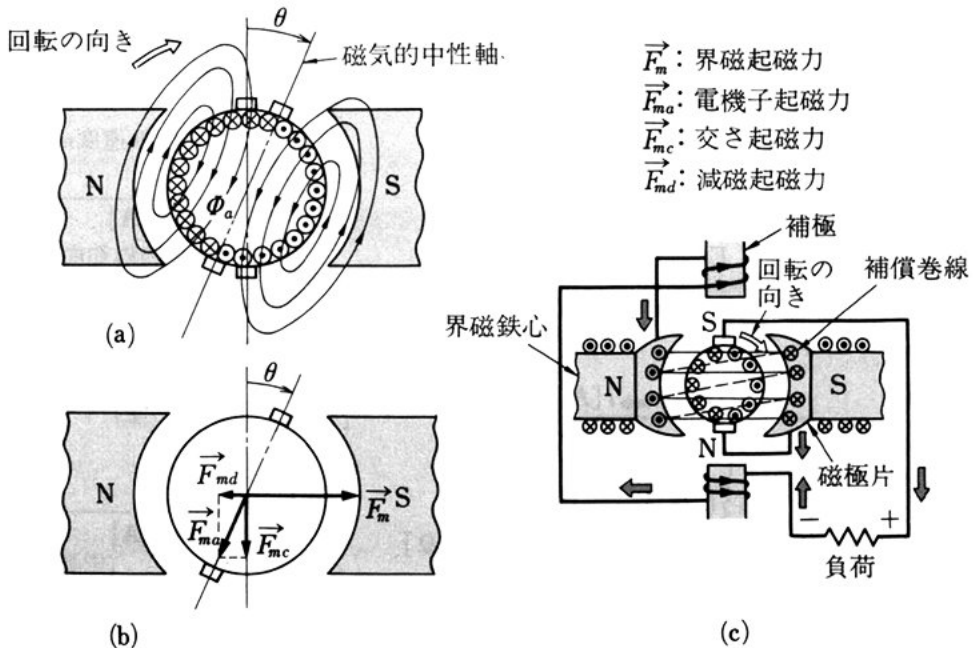
ブラシの移動　このような障害をなくすには，ブラシの位置を回転の向きに角度 θ だけ移動させる必要がある。こうすると，電機子電流による磁束は，図 11 (a) に示すようになる。

この磁束を生じさせる起磁力を**電機子起磁力**といい，$\vec{F}_{ma}$ で表す。図 (b) は，$\vec{F}_{ma}$ と**界磁起磁力** $\vec{F}_m$ をベクトル図で表したものである。　5
図 (b) からわかるように，電機子起磁力 $\vec{F}_{ma}$ の界磁起磁力 $\vec{F}_m$ の方向のベクトル $\vec{F}_{md}$ は $\vec{F}_m$ の大きさを小さくしている。この働きを**減磁作用**といい，$\vec{F}_{md}$ は**減磁起磁力**とよばれる。また，電磁子起磁力

$\vec{F}_{ma}$ の界磁起磁力 $\vec{F}_m$ の方向に垂直なベクトル $\vec{F}_{mc}$ は $\vec{F}_m$ の方向を曲げている。この働きを**交さ磁化作用**といい，$\vec{F}_{mc}$ は**交さ起磁力**とよばれる。

補償巻線と補極　電機子反作用の影響を防ぐために，図 11(c)に示すように，磁極片に巻線を設け，電機子巻線に直列に接続し，電機子電流と逆向きに電流を流すようにした巻線を**補償巻線**という。また，整流中のコイル(ブラシで短絡しているコイル)に生じる電圧を打ち消すような起電力が誘導されるように，**補極**が用いられる。このような二つの方法によって，ブラシを移動しないですむ工夫がなされている。

一般に，大形機では，電機子反作用がきわめて大きいので，補償巻線が広く用いられるが，小形機では，構造が複雑になり，経費もかさむので用いられない。

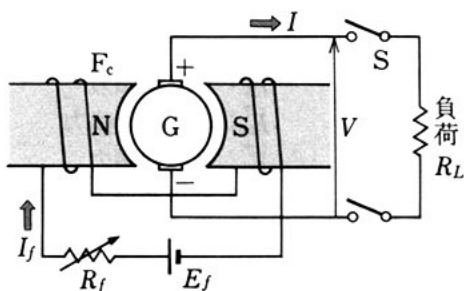
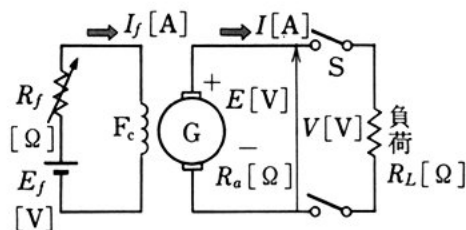
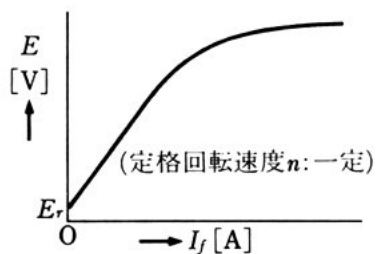
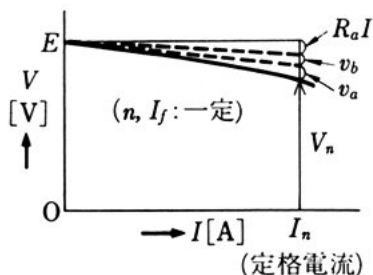
図 11　電機子反作用

3．直流発電機の特性

直流発電機には，界磁磁束を作る方法によって，他励発電機と自励発動機がある。

（1）他 励 発 電 機

図12(a)は，他励発電機の原理図であり，図(b)は，その回路図である。界磁巻線 F_c に流す界磁電流 I_f [A] は，外部の電源 E_f [V] から供給される。このような直流発電機を**他励発電機**という。

無負荷飽和曲線　スイッチSを開いて，電機子を定格回転速度 n [rpm] で回転させ，界磁電流 I_f [A] を増加すると，起電力 E [V] は，I_f [A] にほぼ比例して大きくなる。しかし，I_f [A] がある大きさ以上になると，鉄心の磁気飽和のために，E [V] は増加しなくなる。この関係を図(c)に示す。このように無負荷の状態において界磁

図 12　他励発電機の回路と特性

(a) 原理図

(b) 回路図

(c) 無負荷飽和曲線

(d) 外部特性曲線

電流 I_f [A] と起電力 E [V] との関係を示す曲線を**無負荷飽和曲線***という。なお，E_r [V] は残留磁気による起電力である。

外部特性曲線　直流発電機を定格回転速度 n [rpm] で回転させ，定格電圧 V_n [V] のときに，定格電流 I_n [A] となるように界磁抵抗 R_f [Ω] と負荷抵抗 R_L [Ω] を調整する。回転速度 n [rpm]，界磁電流 I_f [A] を変えないで，負荷抵抗 R_L [Ω] を変化させるときの負荷電流 I [A] と端子電圧 V [V] との関係を示す曲線を**外部特性曲線**という。図 12 (d) は，外部特性曲線の例で，負荷電流 I [A] の増加に伴って端子電圧 V [V] が減少する傾向がみられる。これは電機子巻線抵抗 R_a [Ω] による電圧降下 R_aI [V]，電機子反作用による電圧降下 v_a [V]，ブラシの接触による電圧降下 v_b[V] があるためである。これは次の式で表される。

$$V = E - (R_aI + v_a + v_b)$$

問 2.　他励発電機に負荷をかけたところ，端子電圧 V は 200 [V] で負荷電流 I は 60 [A] であった。この発電機の誘導起電力 E [V] はいくらか。ここで，電機子巻線抵抗 R_a を 0.05 [Ω]，電機子反作用による電圧降下 v_a を 2 [V]，ブラシの接触による電圧降下 v_b を 1 [V] とする。

（2） 自 励 発 電 機

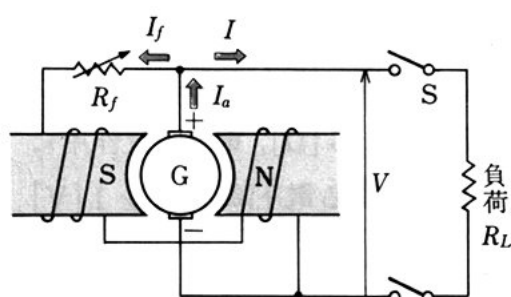
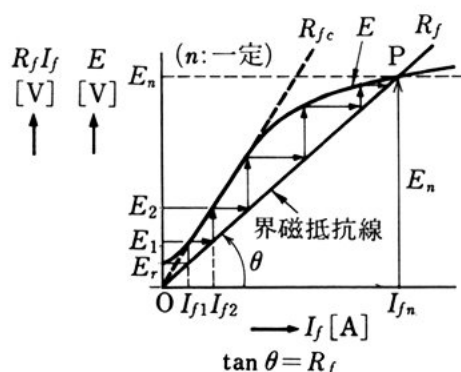
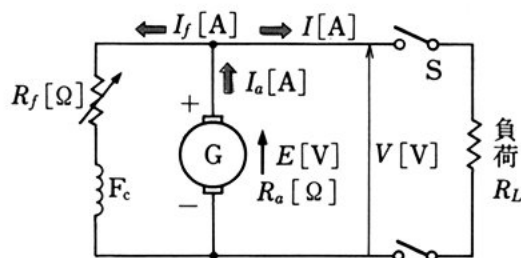
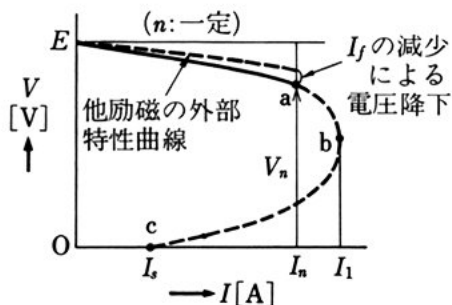
直流発電機において，自己の誘導起電力を利用して磁極を励磁すれば，外部の直流電源は不要になる。このような考え方の発電機を**自励発電機**という。 この場合，電機子巻線と界磁巻線の接続のしかたによって，図 13，14，15 に示す分巻発電機・直巻発電機・平複巻発電機がある。

---

*　自励発電機においても，無負荷飽和曲線は，他励方式にして，定格回転速度で運転して求める。

分巻発電機の電圧の発生　図 13 (b), (c) において，電機子が回転すれば，まず磁極の残留磁束によって，電機子巻線に E_r[V] の起電力が誘導され，それによって界磁巻線に I_{f1} [A] の電流が流れる。I_{f1} [A] の電流による磁束と残留磁束の向きが同じであれば，それらの和の磁束によって電機子巻線に E_1 [V] の起電力が誘導され，それによって，界磁巻線には I_{f2} [A] の電流が流れる。さらに I_{f2} [A] の電流によって，電機子巻線には E_2 [V] の起電力が誘導される。

このような経過をすばやくたどって，電機子巻線には安定した起電力 E_n[V] が得られることになる。なお，界磁抵抗 R_f [Ω] に R_{fc} [Ω] より大きな抵抗を用いると，安定した高い電圧は得られない。

図 13　分巻発電機の回路と特性

(a)　原理図

(c)　電圧の発生過程

(b)　回路図

(d)　外部特性曲線

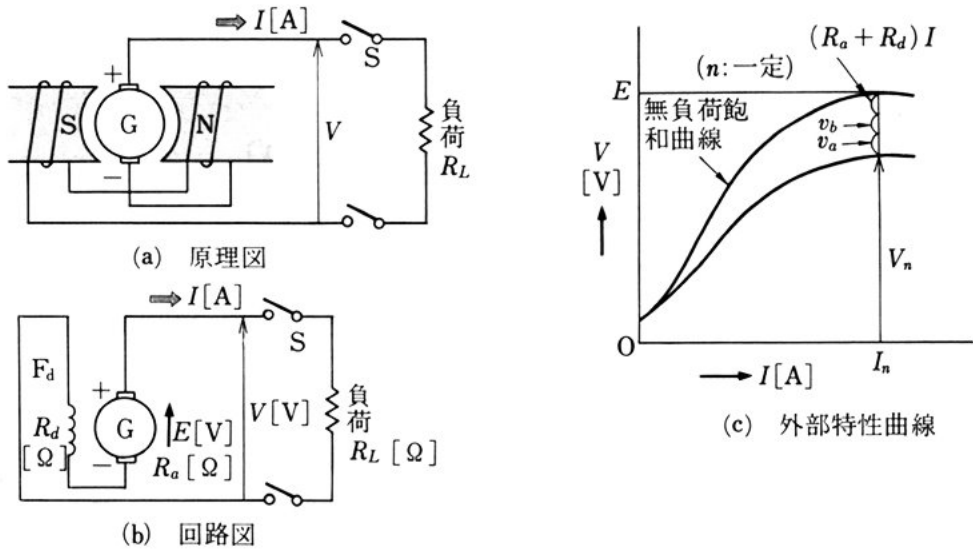



図 14　直巻発電機の回路と特性

この抵抗 R_{fc} [Ω] を**臨界抵抗**という。

分巻発電機の外部特性曲線は，図 13(d) のように，負荷電流を大きくすると端子電圧は減少する。負荷をさらに大きくすると，電流の最大値の点 b を通って点 c に達する。点 c の電流は短絡電流で，このときの回路の誘導起電力は，残留磁束によるものである。

直巻発電機の外部特性曲線は，界磁巻線を切り離し，他励発電機として無負荷飽和曲線を求め，この曲線から電機子巻線抵抗と界磁巻線抵抗の電圧降下 $(R_a+R_d)I$ [V]，電機子反作用による電圧降下 v_a [V]，およびブラシの接触による電圧降下 v_b [V] を差し引いたものである。

例題 2.　分巻発電機に 8 [Ω] の負荷抵抗 R_L [Ω] を接続し，定格回転速度 n [rpm] で回転している。端子電圧 V を 100 [V] にするために，界磁抵抗を調整して界磁電流 I_f を 2.5 [A] にした。このときの負荷電流 I [A] と誘導起電力 E [V] はいくらか。ここで，電機子巻線抵抗 R_a を 0.4 [Ω]，電機子反作用によ

る電圧降下 v_a を 2 [V]，ブラシの接触による電圧降下 v_b を 1 [V] とする。

解答 負荷電流 I [A] は，$I=\frac{V}{R_L}=\frac{100}{8}=12.5$ [A]

電機子電流 I_a [A] は，　$I_a=I+I_f=12.5+2.5=15$ [A]

したがって，誘導起電力 E [V] は，

$$E=V+I_aR_a+v_a+v_b=100+15\times0.4+2+1=109\ [V]$$

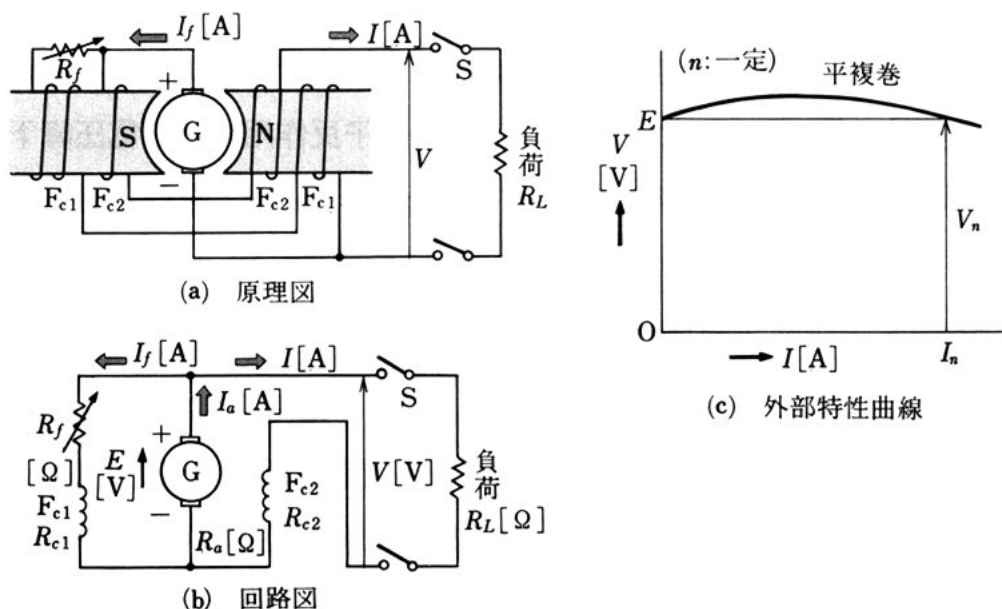
となる。

問 3. 直巻発電機に負荷抵抗 R_L [Ω] を接続し，定格回転速度 n [rpm] で回転するとき，誘導起電力 E が 202 [V]，電機子電流 I_a が 20 [A] であった。このときの負荷抵抗 R_L [Ω] と発電機の出力 P [kW] はいくらか。ここで，電機子巻線抵抗 R_a [Ω] および直巻界磁巻線抵抗 R_d [Ω] は，いずれも 0.05 [Ω] とする。

平複巻発電機　分巻発電機と直巻発電機の外部特性曲線は，負荷電流の増減に対して，互いに逆の関係になっている。そこで，こ

図 15　平複巻発電機の回路と特性

(a)　原理図

(b)　回路図

(c)　外部特性曲線

れらの特性を重ね合わせた特性の発電機にすれば，負荷に関係なくほぼ一定の電圧が得られる。図 15(a) に示す発電機は，このような理由から考えられたものである。分巻界磁巻線 F_{c1} と直巻界磁巻線 F_{c2} を設け，この二つの巻線が作る磁束が加わり合うように接続するものを**和動複巻**という。また，この外部特性曲線は，図(c) に示すように，負荷電流 I が 0 [A] のときと，定格電流 I_n [A] のときの端子電圧 V [V] とは等しくなっている。このような特性の発電機を**平複巻発電機**という。

例題 3.　平複巻発電機に負荷抵抗 R_L [Ω] を接続して，定格回転速度 n [rpm] で回転したとき，発電機の端子電圧 V が 110 [V]，負荷電流 I が 50 [A] であった。このときの誘導起電力 E [V] と電機子電流 I_a [A] はいくらか。ただし，電機子巻線抵抗 R_a は 0.07 [Ω]，分巻界磁巻線抵抗 R_{c1} は 40 [Ω]，直巻界磁巻線抵抗 R_{c2} は 0.01 [Ω]，界磁抵抗器の抵抗 R_f は 15 [Ω]，ブラシの接触による電圧降下 v_b は 2 [V] であり，電機子反作用の影響は無視するものとする。

解答　分巻界磁回路の電圧 V_f [V] は，

$$V_f = V + R_{c2}I = 110 + 0.01 \times 50 = 110.5\ [\mathrm{V}]$$

分巻界磁回路の電流 I_f [A] は，

$$I_f = \frac{V_f}{R_{c1} + R_f} = \frac{110.5}{40 + 15} = \frac{110.5}{55} = 2.01\ [\mathrm{A}]$$

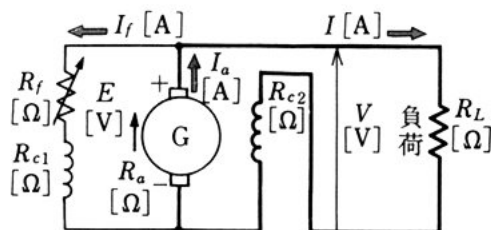



図 16

したがって，電機子電流 I_a [A]，および誘導起電力 E [V] は，

$$I_a = I + I_f = 50 + 2.01 = 52.0 \text{ [A]}$$

$$E = V_f + R_a I_a + v_b = 110.5 + 0.07 \times 52.0 + 2 = 116 \text{ [V]}$$

となる。

問 4. 分巻発電機と直巻発電機の外部特性曲線の違いを述べよ。　5

問 5. 分巻発電機において，誘導起電力 E が 110 [V]，電機子巻線抵抗 R_a が 0.1 [Ω]，ブラシの接触による電圧降下 v_b が 2 [V]，負荷電流 I が 50 [A] であるとき，発電機の端子電圧 V [V] と出力電力 P [W] を求めよ。ただし，電機子反作用の影響と界磁電流 I_f [A] は無視する。　10

問　　題

1. 図 17 の電機子内部の回路図を示せ。

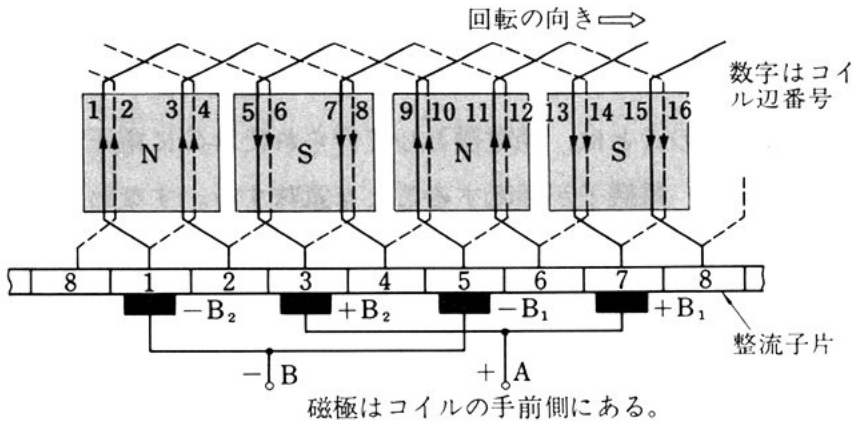



図 17

2. 分巻発電機を, 正規の向きと逆に回転させたとき, 端子電圧は発生するか。

3. 直巻発電機の負荷抵抗が, ある値より大きくなると, 安定した電圧が得られなくなる。なぜか。

4. 極数 p が 4, 電機子巻線の全導体数 Z が 960, 並列回路数 a が 4 の直流発電機がある。この発電機を回転速度 n が 750 [rpm] において, 600 [V] の電圧 V を発生させるには, 各極の磁束 Φ [Wb] をいくらにすればよいか。

5. 端子電圧 V が 200 [V], 負荷電流 I が 100 [A], 回転速度 n が 1200 [rpm] で運転している他励発電機がある。回転速度 n だけを 1000 [rpm] に下げると, 端子電圧 V [V] および負荷電流 I [A] はいくらになるか。ただし, 電機子回路の抵抗 R_a は 0.15 [Ω] とし, 電機子反作用の影響は無視する。

2 直流電動機

この節の目標　磁界中に置かれた導体が運動すると，導体に起電力が誘導される。逆に，磁界中の導体に電流を流すと，導体に力が働く。このことは，発電機として作られたものに電圧を加えて電流を流すと，電機子が回転することを意味する。すなわち，電動機として働くわけである。

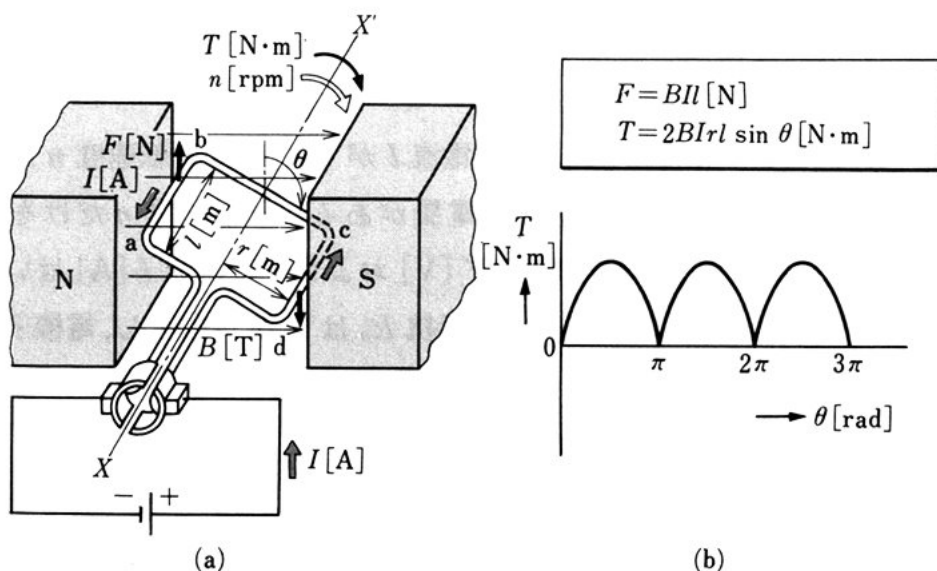
ここでは，直流電動機の原理・特性・用途について調べる。

1. 直流電動機の理論

(1) 直流電動機の原理

図1(a)に示すように，磁束密度が B [T] の平等磁界中に，XX' を回転軸として方形コイルを置く。このコイルに電流 I [A] を流す

図1　トルクの発生

(a)　(b)

と，コイルの回転軸の方向の辺 ab, cd には，それぞれフレミングの左手の法則によって定まる向きに力 F [N] が生じる。辺 ab, cd の長さを l [m] とすれば，この辺に生じる力 F [N] は $F=BIl$ で表される。

辺 ab と cd に生じる力は偶力として働き，磁界と電流の向きが図(a)に示すとおりとすれば，コイルには時計回りに回転しようとするトルク T [N·m] を生じる。このコイルの回転半径を r [m]，磁界に垂直な面に対してコイルの面がなす角度を θ [rad] とすれば，コイルに生じるトルク T [N·m] は，次の式で表される。

$$T=2Fr\sin\theta=2BIrl\sin\theta \qquad (1)$$

コイルが半回転すると，整流子とブラシの働きによって，同じ磁極の側にある導体には，つねに同じ向きの電流が流れるから，コイルは引き続いて同じ向きのトルクで回転し，電動機として働く。

コイルが一組では，図1からわかるように，角度 θ が 0 や π [rad] のときには，トルクが 0 となり，始動しない瞬間もあるので，図2に示すように，電機子巻線を多数巻きにする。また，トルクを大きくするために，コイルの中に磁束密度の大きな鉄心を設けるなど，すでに学んだ直流発電機と同じ構造にする。

問 1. 図1(a)において，磁束密度 B が 0.1 [T]，コイルの ab 部分の長さ l が 0.4 [m]，コイルの回転半径 r が 0.2 [m]，コイルを流れる電流 I が 10 [A]，コイルの位置を示す角度 θ が $\frac{\pi}{2}$ [rad] のとき，コイルに働くトルク T [N·m] はいくらか。

(2) トルクと出力

図2に示すように，磁界中の電機子巻線に電流が流れると，各電機子導体には電磁力が生じる。図において，電機子の半径を r [m]，磁極と電機子の間のエアギャップにおける磁束密度を B'

(a)　　(b)

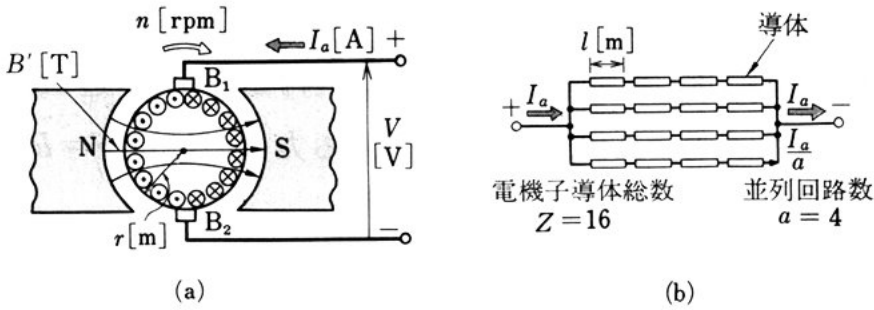



図2　トルクと出力

[T]，電機子導体1本の長さを l [m]，並列回路数を a，電機子電流を I_a [A] とすると，導体1本に働く力 F' [N] およびトルク T' [N・m] は，それぞれ式(2)，(3)で表される。

$$F' = B' l \times \frac{I_a}{a} \quad (2)$$

$$T' = F' r = \frac{B' r l I_a}{a} \quad (3)$$

1極当たりの磁束を Φ [Wb]，極数を p とすると，エアギャップの平均磁束密度 B' [T] は，次の式で表される。

$$B' = \frac{\Phi}{\dfrac{2\pi r l}{p}} = \frac{p\Phi}{2\pi r l} \quad (4)$$

電機子導体の総数を Z とすれば，電機子を回転させるトルク T [N・m] は，導体1本に働くトルク T' [N・m] の Z 倍であり，また式(3)と(4)から式(5)となる。

$$T = T' \times Z = \frac{p\Phi}{2\pi r l} \times \frac{r l I_a}{a} \times Z = \frac{pZ}{2\pi a} \times \Phi I_a = K_1 \Phi I_a \quad (5)$$

$K_1 = \dfrac{pZ}{2\pi a}$ は，電機子の構造から決まる定数である。直流電動機のトルクは，1極の磁束 Φ [Wb] と電機子電流 I_a [A] との積に比例する。

また，電機子全体には F [N] の力が働いているので，電機子が 1 回転する間にする仕事 W [J] は，次の式で表される。

$$W = 2\pi rF = 2\pi T \qquad (6)$$

直流電動機の回転速度を n [rpm] とすると，電機子が 1 秒間にする仕事，すなわち出力 P [W] は，次の式で表される。

$$P = 2\pi \frac{n}{60} T \qquad (7)$$

このように，出力 P [W] は回転速度 n [rpm] とトルク T [N・m] の積に比例する。

問 2.　磁極数 p が 4，磁束 Φ が 0.025 [Wb]，並列回路数 a が 4，電機子電流 I_a が 50 [A]，電機子の半径 r が 15 [cm]，電機子導体の総数 Z が 160 本，回転速度 n が 1500 [rpm] の直流電動機のトルク T [N・m] と出力 P [W] を求めよ。

（3）　逆起電力と電機子電流

図 2(a) において，外部から直流電圧 V [V] を加えると，電機子電流 I_a [A] が流れ，電機子が回転する。この場合，電機子巻線は磁束を切って回転するので，電機子巻線には，外部からの直流電圧，すなわち電源電圧と逆向きに，すなわち電機子電流を減少させる向きに誘導起電力が生じる。そのために，この誘導起電力は**逆起電力**とよばれる。

したがって，ブラシの接触による電圧降下や電機子反作用を無視すると，直流電動機の電機子の回路は，図 3 の等価回路で表される。

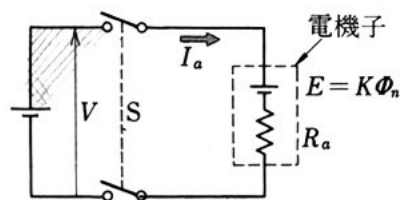



図 3　逆起電力と電機子電流

電機子電流 I_a [A] は，外部からの直流電圧，すなわち端子電圧 V [V] と逆起電力 E [V] の差の電圧に比例し，電機子巻線抵抗 R_a [Ω] に反比例し，次の式で表され

る。

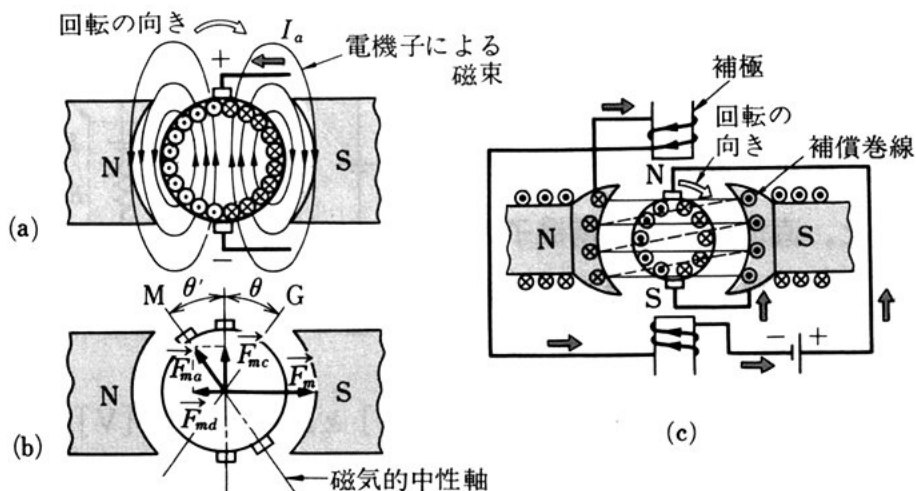
$$I_a=\frac{V-E}{R_a} \qquad (8)$$

式（8）において，電機子の回転速度を n [rpm] とすれば，逆起電力 E [V] は，直流発電機で調べたように，次の式で示される（10ページ式（4）参照）。

$$E=\frac{p}{a}\Phi Z\frac{n}{60}=K\Phi n \qquad (9)$$

もし，直流電動機に課せられる機械的な負荷が増加し，回転速度 n [rpm] が低下すると，逆起電力 E [V] は，式（9）に従い，回転速度 n [rpm] に比例して減少する。また，式（8）から，端子電圧 V [V] が一定で逆起電力 E [V] が減少すると，電機子電流 I_a [A] は増加する。そうすると，直流電動機に供給される電力 P_i [W] は，$P_i=VI_a$ であるから，増加することになる。

電機子反作用と対策　電機子反作用は，直流電動機の場合にも，電機子電流が流れることによって生じる。このとき，電機子電流の

図4　電機子反作用

向きは，直流発電機の場合と逆向きであるため，電機子電流 I_a による磁界が，図4(a)に示す向きに生じる。この磁界の磁束と界磁磁束が合成された磁気的中性軸は，回転の向きと逆向きに角 θ' [rad] だけ偏る。そこで電動機の場合も，起磁力をベクトルで表すと，図(b)に示すようになるから，発電機の場合と逆向きにブラシを移動させて，整流子とブラシの間に火花などが発生しないようにする。このような作用を防ぐために，図(c)に示す補償巻線や補極を設ける。

この場合，電機子反作用や整流作用の向きが直流発電機の場合とは反対になるので，補償巻線や補極の極性は，直流発電機の場合と反対でなければならないが，電機子電流の向きが反対であるので，それらの接続は，直流発電機の場合と同じでよい。

例題 1． 端子電圧 V が 210 [V]，電機子電流 I_a が 110 [A]，回転速度 n が 1200 [rpm] で運転している直流電動機がある。この電動機の発生トルク T [N·m] はいくらか。ただし，電機子巻線抵抗 R_a は 0.2 [Ω] であり，ブラシの接触による電圧降下，電機子反作用は無視する。

解答 式(8)から，$E=V-R_aI_a$ が得られ，両辺に I_a を掛けると，

$$EI_a=VI_a-R_aI_a^2$$

となる。ここで，右辺の VI_a [W] は電機子の回路の入力，$R_aI_a^2$ [W] は電機子の回路の抵抗損であるから，EI_a [W] は，電動機において機械動力に変換される電力，すなわち電動機の出力である。

したがって，発生トルク T [N·m] は，式(7)と上式から，

$$T=\frac{P}{2\pi n}\times 60=\frac{VI_a-R_aI_a^2}{2\pi n}\times 60=\frac{210\times 110-0.2\times 110^2}{2\pi\times 1200}\times 60$$

$$=165\ [\mathrm{N\cdot m}]$$

となる。

問 3． 直流電動機で，端子電圧 V が 210 [V]，電流子電流 I_a が 50

[A], 電機子巻線抵抗 R_a が 0.2 [Ω], 回転速度 n が 1500 [rpm] のとき，トルク T [N・m] はいくらか。

問 4.　直流電動機の電機子に 100 [V] の電圧 V が加えられ，20 [A] の電流 I が流れているとき，電機子回路の抵抗 R_a [Ω] はいくらか。ただし，電機子に発生している逆起電力 E は 94 [V] とする。

2.　直流電動機の特性

（1）　分巻電動機の特性

一般に，直流電動機などの原動機では，負荷の増減によって，回転速度やトルクが変化する。

速度特性　　図 5 において，端子電圧 V [V]，界磁抵抗 R_f [Ω] を一定にすれば，界磁磁束 Φ [Wb] は一定であって，電機子の回転速度 n [rpm] は，式（8）と式（9）から，次の式で表される。

$$n=\frac{V-R_aI_a}{K\Phi} \tag{10}$$

図 5　分巻電動機の回路と特性

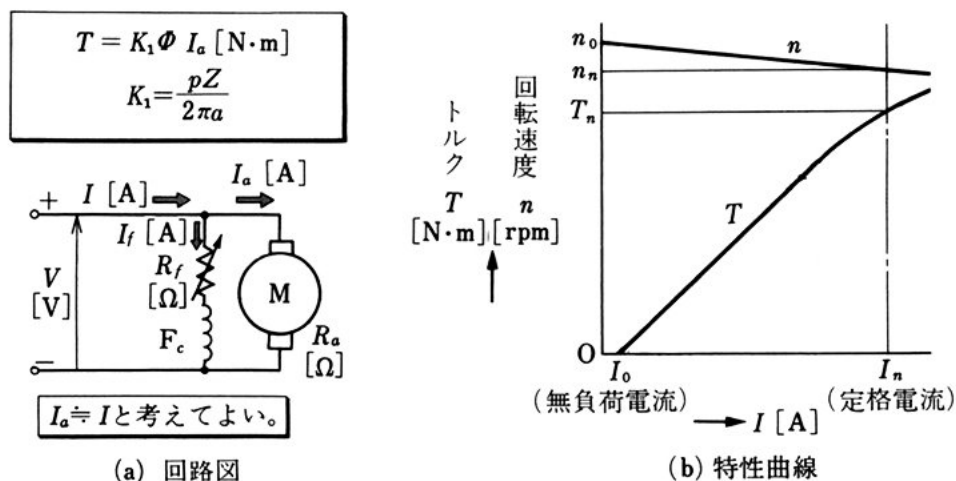
$T=K_1\Phi\ I_a$ [N・m]

$K_1=\frac{pZ}{2\pi a}$

+　I [A]　I_a [A]　I_f [A]　R_f [Ω]　M　V [V]　F_c　R_a [Ω]　−

$I_a \fallingdotseq I$ と考えてよい。

(a) 回路図

(b) 特性曲線

いま，機械的な負荷が増加すると，電機子電流 I_a [A] が増加し，式 (10) に従って回転速度 n [rpm] の値はわずかに減少するが，$R_a I_a$ [V] は端子電圧 V [V] に比べてかなり小さいので，図 (b) に示すように，ほぼ一定である。一般に，負荷に関係なく，回転速度が一定な電動機は，**定速度電動機**とよばれる。

トルク特性　電動機のトルク T [N•m] は，式 (5) から $T=K_1 \Phi I_a$ で示される。分巻電動機の界磁磁束は，ほぼ一定と考えてよいので，トルク T [N•m] は，図 (b) に示すように，負荷電流 I [A] にほぼ比例する。

電動機のトルクは $K_1 \Phi I_a$ [N•m] で表されるが，実際に使用できる有効なトルク T [N] は，$K_1 \Phi I_a$ [N•m] から無負荷電流 I_0 [A] によるトルク $K_1 \Phi I_0$ [N•m] を減じたものである。すなわち，T [N•m] は $T=K_1(I_a-I_0)\Phi$ で表される。

問 5.　分巻電動機で，端子電圧 V が 100 [V]，電機子電流 I_a が 40 [A]，電機子巻線抵抗 R_a が 0.2 [Ω]，回転速度 n が 1500 [rpm] のとき，これを無負荷にしたら回転速度 n [rpm] はいくらになるか。

(2)　直巻電動機の特性

直巻電動機の回路は，図 6 (a) のように表され，界磁磁束は電機子電流すなわち負荷電流によって作られる。界磁磁束が磁気飽和しない場合，すなわち未飽和領域を考えると，界磁磁束 Φ [Wb] は，負荷電流 I [A] に比例する。したがって，回転速度 n [rpm] は，式 (10) から次のように示される。

$$n=\frac{V-R_a I}{K\Phi}=\frac{V-R_a I}{kI}\fallingdotseq k'\frac{V}{I} \qquad (11)$$

それで，図 (b) に示すように，回転速度 n [rpm] は，負荷電流 I [A] の増加に反比例して減少する。このように，直巻電動機は，負

(a) 回路図　　(b) 特性曲線

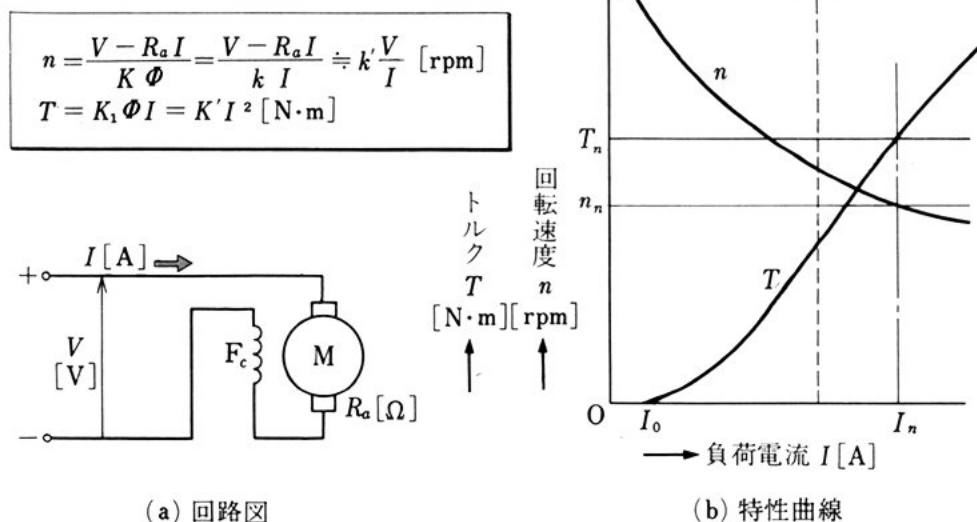



図 6　直巻電動機の回路と特性

荷電流の増減によって回転速度が大きく変わるので，**変速度電動機**とよばれる。

直巻電動機のトルク T [N·m] は，界磁磁束の未飽和領域を考えると，24 ページの式 (5) ならびに界磁磁束 Φ [Wb] が負荷電流 I [A] に比例するということからわかるように，次の式で示される。　5

$$T=K_1\Phi I=K'I^2 \qquad (12)$$

すなわち，トルク T [N·m] は，負荷電流 I [A] の 2 乗に比例し，図 (b) に示すようになる。なお飽和領域では，界磁磁束 Φ [Wb] はほぼ一定であるから，トルク T [N·m] は，負荷電流 I [A] に比例する。直巻電動機は，始動時のトルクが大きいという特徴がある。　10

例題 2.　直巻電動機が端子電圧 V が 400 [V]，負荷電流 I が 40 [A] のとき，回転速度 n は 1200 [rpm] であった。端子電圧 V を 300 [V] にすると，同じ負荷電流に対して回転速度はいくらになるか。ただし，電機子巻線および界磁巻線の抵抗はいずれも 0.4 [Ω] とし，ブラシの接触による電圧降下と電機子反作用による電圧降下は無視する。　15

解答 端子電圧 V が 400 [V] と 300 [V] のときの式（8）から，逆起電力 E_1 [V]，E_2 [V] を求めると，

$$E_1 = V_1 - I_a R_a = 400 - 40 \times 0.4 = 384 \text{ [V]}$$

$$E_2 = V_2 - I_a R_a = 300 - 40 \times 0.4 = 284 \text{ [V]}$$

負荷電流 I [A] が同じであるから，磁束 Φ [Wb] は一定である。このとき，回転速度 n [rpm] は逆起電力 E [V] に比例する。したがって，

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{E_2}{E_1}$$

で表されるから，求める回転速度 n_2 [rpm] は，

$$n_2 = \frac{E_2}{E_1} n_1 = \frac{284}{384} \times 1200 = 888 \text{ [rpm]}$$

となる。

問 6．直巻電動機で，無負荷になると回転速度 n [rpm] はどうなるか。

問 7．直巻電動機で，負荷電流 I が 50 [A]，回転速度 n が 1000 [rpm] のとき，負荷トルクを半減したら，負荷電流 I [A] および回転速度 n [rpm] はいくらになるか。ただし，磁気飽和および電機子の回路の抵抗は無視する。

（3） 複巻電動機の特性

複巻電動機には，和動複巻電動機と差動複巻電動機がある。図 7 (a) の回路に示すように，複巻電動機の合成界磁磁束が直巻界磁磁束と分巻界磁磁束の和になっている構造のものを**和動複巻電動機**という。その特性は，図 7 (b) に示すようになり，分巻の場合に比べると，負荷電流の増加に従って，回転速度 n [rpm] は減少の割合が大きく，トルク T [N·m] は増加の割合が大きい。

また，合成界磁磁束が直巻界磁磁束と分巻界磁磁束の差になっている構造のものを**差動複巻電動機**という。

(a) 回路図

(b) 特性曲線

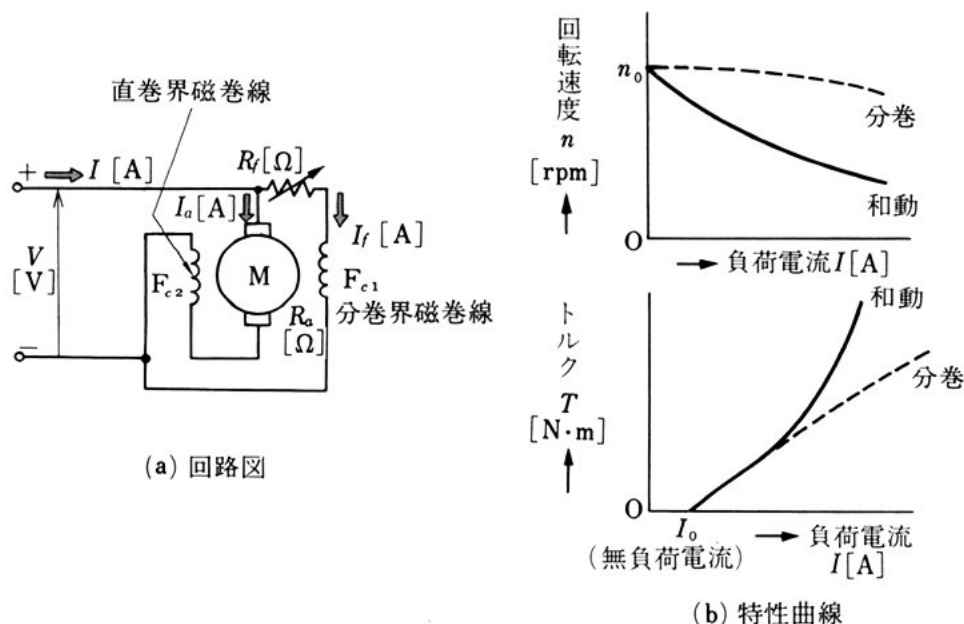



図 7　和動複巻電動機の回路と特性

問 8.　和動複巻電動機と分巻電動機について，回転速度 n [rpm] とトルク T [N·m] の特性を比較せよ。

3.　始動と速度制御

(1)　始　　動

図 8 において，抵抗 R が 0 [Ω] で，外部から加わる電圧，すなわち端子電圧を V [V] とすると，

式 (10) から電機子電流 I_a [A] は $I_a=\dfrac{V-K\Phi n}{R_a}$ で表される。電圧を加えた瞬間は，回転速度 n が 0 [rpm] であるから，逆起電力 E [V] は，$E=K\Phi n=0$ で，電機子電流 I_a [A] は $I_a=\dfrac{V}{R_a}$ となる。

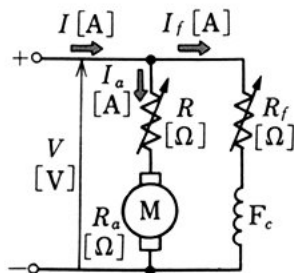



図 8　分巻電動機の始動

電機子巻線抵抗 R_a [Ω] はきわめて小さいので，過大な電流が流れ，電機子巻線を焼損するおそれがある。これを防止するためには，あらかじめ，電機子の回路に直列に抵抗 R [Ω] を接続しておき，端子電圧 V [V] を加える。そして回転速度 n [rpm] が上昇するに従って，その抵抗値 R [Ω] を減少させる。このように工夫した抵抗を**始動抵抗**といい，電動機の電源スイッチを閉じた直後の最大電流を**始動電流**という。

例題 3. 電機子巻線抵抗 R_a が 0.4 [Ω]，界磁抵抗 R_f (F_c の抵抗も含む) が 55 [Ω] の分巻電動機がある。これに 110 [V] の定格電圧 V_n を加えると，始動電流 I_s [A] はいくらになるか。また，始動電流 I_s を 25 [A] に制限するには，電機子の回路にいくらの始動抵抗 R [Ω] を入れればよいか。

解答 始動抵抗 R が 0 [Ω] のとき，始動電流 I_s [A] は，

$$I_s = I_a + I_f = \frac{V}{R_a} + \frac{V}{R_f} = \frac{110}{0.4} + \frac{110}{55}$$

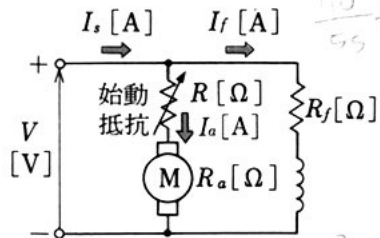
$$= 277 \text{ [A]}$$

$I_s = 25$ [A] にするための，始動抵抗 R [Ω] は，

$$I_s - I_f = I_a = 25 - 2 = 23 \text{ [A]}$$

$$R = \frac{V}{I_a} - R_a = \frac{110}{23} - 0.4 = 4.4 \text{ [Ω]}$$

となる。

図 9

問 9. 電機子抵抗 R_a が 0.4 [Ω]，界磁抵抗 R_f が 55 [Ω] の分巻電動機がある。これに 110 [V] の端子電圧 V を加えたとき，始動電流 I_s [A] を定格電流の 1.5 倍に制限するには，電機子の回路にいくらの始動抵抗 R [Ω] を入れればよいか。ただし，定格状態で運転しているときの逆起電力 E は 100 [V] とする。

(2) 速 度 制 御

負荷に直結された電動機は，場合によっては，回転速度を変化させたいことがある。例えば，製鉄工業における圧延機ローラ駆動では，精密に回転速度を制御することが必要であり，電車用電動機では，広範囲に回転速度を変える必要がある。このように，必要に応じて回転速度を変えることを，**速度制御**（speed control）という。

直流電動機の回転速度 n [rpm] は，次の式で表される。

$$n=\frac{V-I_a(R_a+R)}{K\Phi} \tag{13}$$

回転速度 n [rpm] を変えるには，界磁磁束 Φ [Wb]，直列抵抗 R [Ω]，端子電圧 V [V] のいずれかを変えればよい。これらによる速度制御法をそれぞれ界磁制御法・抵抗制御法・電圧制御法とよぶ。

界磁制御法は，界磁調整器を加減して界磁磁束の大きさを変え，速度制御をする方法である。分巻電動機では，図10の界磁抵抗器の抵抗値 R_f [Ω] を変えて回転速度を制御する。

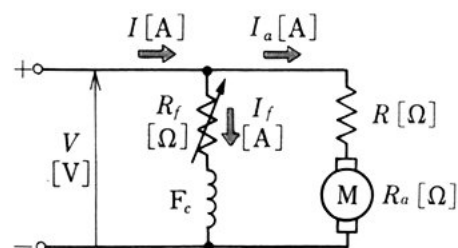



図 10　分巻電動機の速度制御

抵抗制御法は，電機子の回路に直列に抵抗を挿入して速度制御をする方法で，主に直巻電動機の制御に用いられる。

電圧制御法は，電機子巻線に加わる電圧を変化させて速度制御をする方法であり，主に他励電動機に用いられるレオナード方式と，直巻電動機に用いられる直並列制御法とがある。

レオナード方式は，電動機の電機子に加わる可変電圧を，専用の直流電源を設けて供給するようにしたものである。図11はレオナード方式で，他励発電機Gの界磁電流を調整し，主電動機Mへの供給

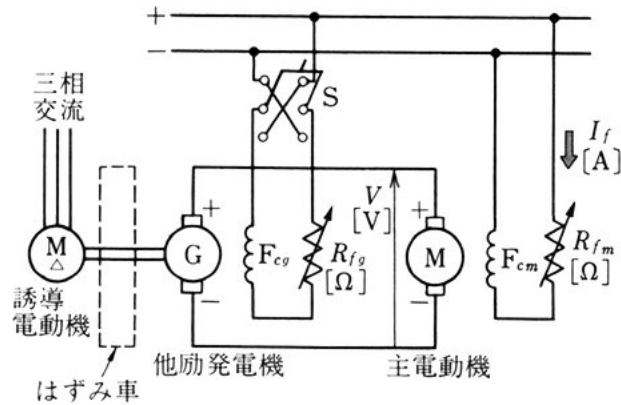



図 11　レオナード方式

電圧 V を変化させる。G の界磁スイッチ S を切り換えれば，M を逆転させることもできる。また，M の界磁を調整すれば，回転速度をさらに広範囲に変えることができる。また，この方法では，G の電圧を徐々に上げて M を始動させるから，始動抵抗器はいらない。

5　なお，他励発電機 G と誘導電動機の直結軸に大きなはずみ車をつけると，その回転エネルギーによって主電動機 M の負荷が急激に変化しても，誘導電動機への負荷の変動を緩和することができ，誘導電動機の容量も比較的小さくすることができる。また，他励発電機の代わりにサイリスタを用いる方法は**静止レオナード法**とよばれる。

10　図 12 は，2 台の同じ直巻電動機を直列または並列に接続し，電動機 1 台に加わる電圧を変えることによって速度制御をする方法で，

図 12　直巻電動機の直並列制御

(a)　直列の場合　　(b)　並列の場合

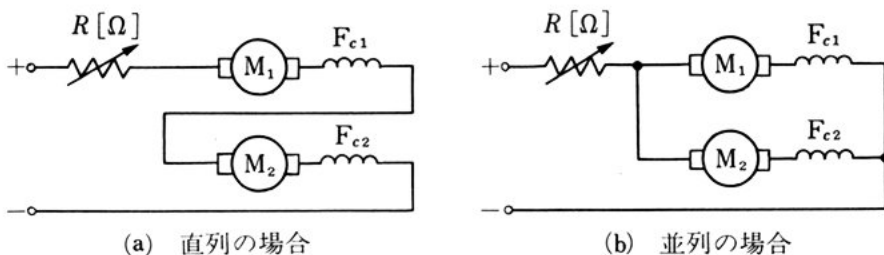



表 1　いろいろな直流電動機の特徴と用途

直流電動機の種類	特　　徴	用　途
他励電動機	○負荷電流の変化に対する速度変動が小さい。 ○静止レオナード方式で運転し，速度を広範囲に細かく調整できる。	大形圧延機 クレーン 高速エレベータ
分巻電動機	○端子電圧を一定とすれば，磁束は一定であるから，他励電動機とほぼ同じである。 ○高速度の範囲で連続的に速度制御ができる。	ポンプ 送風機 工作機械
直巻電動機	○始動トルクが大きい。 ○回転速度は負荷電流により大きく変化する。 ○無負荷にすると回転が高速度になって危険である。	電　車 巻上機
和動複巻電動機	○分巻電動機と直巻電動機の中間の特性をもっている。 ○軽負荷になっても危険な高速度になるおそれがない。 ○トルクの変動の激しい負荷に適する。	エレベータ 工作機械 巻上機
差動複巻電動機	○負荷の変動で運転が不安定になりやすいので，あまり使用されない。	

直並列制御法とよばれる。直並列制御法は，抵抗制御またはチョッパ制御* と組み合わせて，電車用直巻電動機の速度制御に用いられる。

表1には，いろいろな直流電動機の特徴と用途を示す。

逆転法　電動機の回転の向きを変えることを**逆転**という。直流電動機を逆転させるには，原理的には，電機子電流と界磁電流のうち，どちらかの電流の向きを変えればよい。図13は，電機子電流の向きを変える方法の例である。

* 242ページのDCチョッパ参照。

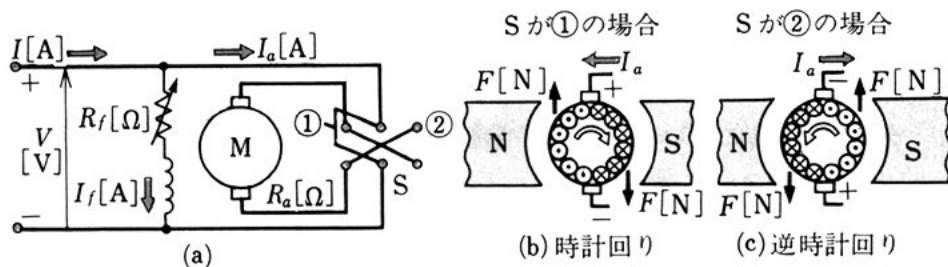



図 13 逆　転　法

問 10．図 11 (b) で，電圧制御範囲では定トルクとなり，界磁制御範囲では定出力となるという。その理由を考えよ。

問 11．端子電圧 V が 600 [V]，直列抵抗 R が 1.5 [Ω]，負荷電流 I が 50 [A]，回転速度 n が 1500 [rpm] で運転している直巻電動機がある。直列抵抗 R を 4 [Ω] にすれば，同じ電流に対して回転速度 n [rpm] はいくらになるか。ただし，電機子巻線抵抗 R_a は 0.5 [Ω] とする。

問　　題

1. 分巻電動機において，電機子巻線抵抗 R_a は 0.15 [Ω]，界磁回路の抵抗 R_f は 100 [Ω]，端子電圧 V は 200 [V]，負荷電流 I は 50 [A]，回転速度 n は 1500 [rpm] である。次の問いに答えよ。

(1) 電機子に発生している電圧は何ボルトか。ただし，電機子反作用による電圧降下とブラシの接触による電圧降下は無視する。　5

(2) この電動機に，200 [V] の電圧 V を加えたときに発生する機械出力は何ワットか。

(3) この電動機に 200 [V] の電圧 V を加えた場合，始動電流 I_s を 60 [A] にするには，始動抵抗の抵抗 R を何オームにすればよいか。　10

2. 直巻電動機について，次の問いに答えよ。

(1) 電源の極性を変えれば，逆向きに回転するか。

(2) 電源に交流電源を用いると，電動機は回転し続けるか。

3. 分巻電動機がある。端子電圧 V が 210 [V]，電機子電流 I_a が 30 [A]，電機子巻線抵抗 R_a が 0.1 [Ω]，回転速度 n が 1500 [rpm] のとき，発生するトルク T [N･m] はいくらか。ただし，電機子反作用による電圧降下，ブラシの接触による電圧降下は無視する。　15

4. 端子電圧 V が 100 [V]，電機子電流 I_a が 30 [A]，電機子巻線抵抗 R_a が 0.15 [Ω] の分巻発電機がある。これを電動機として用い，発電機のときと同じ電流を流し，同じ回転速度 n [rpm] で回転させるには，供給電圧 V は何ボルトにすればよいか。ただし，電機子反作用と界磁電流 I_f [A] は無視する。　20

5. 直巻電動機が全負荷で運転しているとき，負荷電流 I が 100 [A]，回転速度 n が 1000 [rpm] であるとすれば，負荷トルク T が $\frac{3}{4}$ になったとき，負荷電流 I [A] および回転速度 n [rpm] の値はおよそいくらになるか。ただし，磁気飽和および電機子の回路の抵抗は無視する。　25

直流機の定格

この節の目標　直流機に負荷を加えると，直流発電機では電圧が変わり，直流電動機では回転速度が変わる。直流機を使う場合には，これらの特性について知る必要がある。

ここでは，直流発電機や直流電動機の定格について調べ，さらに，電圧変動率・速度変動率・効率などについて考える。

1.　直流発電機の定格

図1(a)に示すように，直流発電機Gを原動機で回転させると，起電力が発生し，スイッチSを閉じると，発電機は負荷に電力 P_0 [W] を供給する。

この場合，発電機は，回転速度 n [rpm] がいくらで，電圧 V [V] がいくらのもとで，どの程度の電流 I [A] を取り出せるかがわかっ

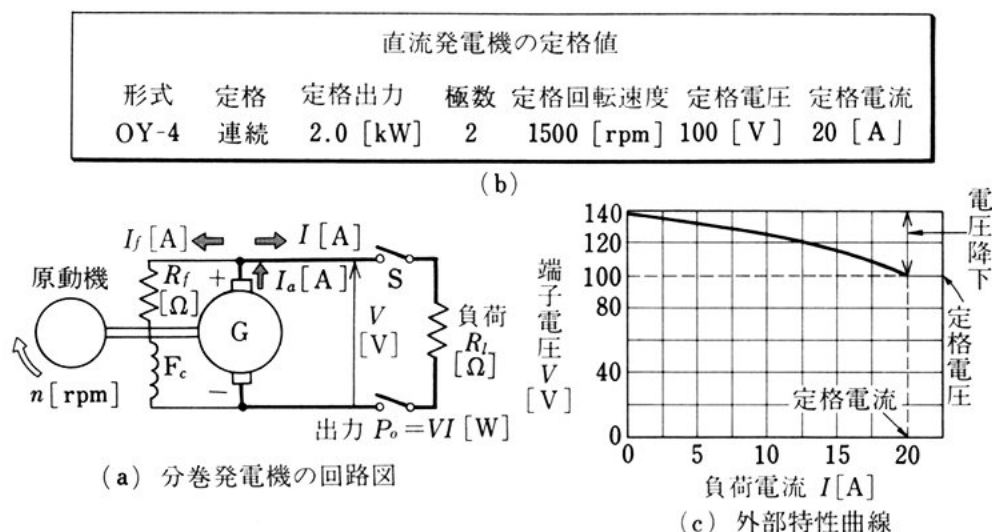
図 1　直流発電機の定格値と電圧変動

直流発電機の定格値

形式	定格	定格出力	極数	定格回転速度	定格電圧	定格電流
OY-4	連続	2.0 [kW]	2	1500 [rpm]	100 [V]	20 [A]

(b)

(a) 分巻発電機の回路図

(c) 外部特性曲線

ていなければ，発電機が過熱したり，焼損したりするおそれがある。

それで，発電機には，電圧・電流・出力・回転速度および，連続的に使用するか，間欠的に使用するかなどについて，標準的な使い方を示す値が銘板に示されている。これらの値を発電機の**定格**または**定格値**という。定格電圧で定格電流が流れる負荷を**定格負荷**という。図1(b)は定格値を銘板に表した例である。例えば，定格回転速度 n は 1500 [rpm], 定格電圧 V_n は 100 [V], 定格電流 I_n は 20 [A] である。

電圧変動率　図1(a)において，原動機が定格回転速度 n [rpm] で回転しているとき，負荷電流 I [A] を増加させると，端子電圧 V [V] は低下する。その程度を表すのに電圧変動率を用いる。無負荷のときの電圧を V_0 [V]，定格負荷のときの電圧を V_n [V] とすると，**電圧変動率** ε [%] は，次の式で表される。

$$\varepsilon=\frac{V_0-V_n}{V_n}\times100 \qquad (1)$$

効　率　直流発電機の電機子は，負荷電流が流れると，原動機の回転の向きと逆向きに力を受ける。この力に打ち勝って，電機子を回転速度 n [rpm] で回転させるのに必要な動力 P_i [W] は，電動機の機械動力に変換される電力 $P_i=EI_a$ で表される。

ところで，外部負荷に供給される電力すなわち出力 P_o [W] は，$P_o=VI$ である。一般に，P_o は P_i より小さい。その差 P_i-P_o は発電機の**損失**となる。そこで，発電機の**効率** η [%] は，次の式で表される。

$$\eta=\frac{P_o}{P_i}\times100 \qquad (2)$$

発電機内部の損失には，電機子巻線や界磁巻線に流れる電流によ

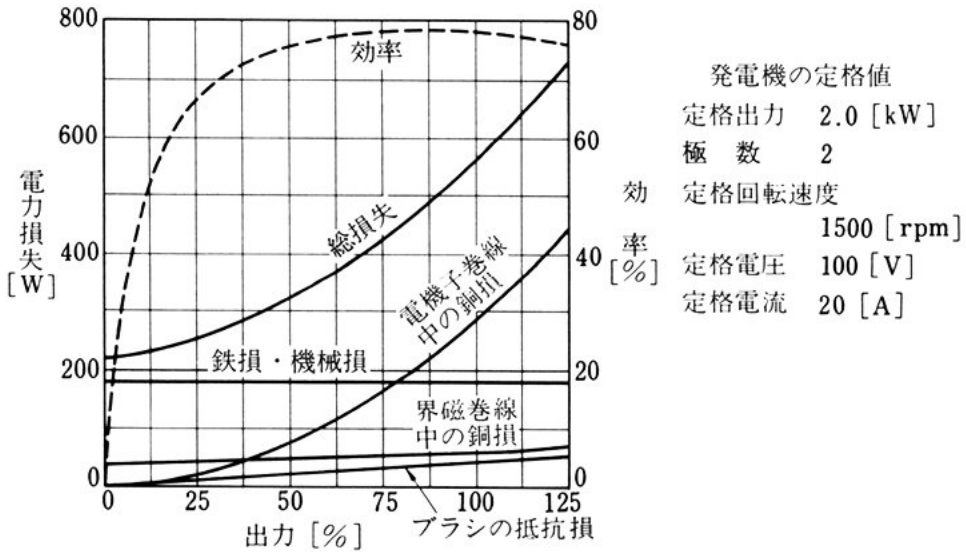



図 2　直流発電機の損失と効率

るジュール熱すなわち**銅損**，鉄心中の損失すなわち渦(うず)電流損やヒステリシス損からなる**鉄損**，回転子の運動による軸受の摩擦損などの**機械損**，ブラシの接触抵抗による抵抗損などがある。図 2 は，出力の大きさに対する損失および効率を示したものである。

問 1.　図 1(c) の特性曲線から電圧変動率 ε［%］を求めよ。

問 2.　定格電圧 V_n が 100［V］，定格出力 P_n が 15［kW］，電機子の回路の抵抗 R_a が 0.05［Ω］の他励発電機がある。電圧変動率はいくらか。ただし，電機子反作用の影響は無視する。

2.　直流電動機の定格

図3(a)に示すように，直流電動機に機械的な負荷を結合して運転するとき，負荷が大きすぎると負荷電流が定格電流以上になり，電機子巻線を焼損するおそれがある。直流電動機にも，図(b)に示すように，その銘板に定格が示されているので，それに従って使用しなければならない。

速度変動率　図3(a)において，負荷を増加すると，回転速度は一般に低下する。その程度を表すのに，速度変動率を用いる。無負荷のときの回転速度を n_0 [rpm] とし，定格負荷のときの回転速度を n_n [rpm] とすると，**速度変動率** ε [%] は，次の式で表される。

$$\varepsilon=\frac{n_0-n_n}{n_n}\times 100 \qquad (3)$$

図 3　直流電動機の定格値と速度変動

直流電動機の定格値

形式	定格	定格出力	極数	定格回転速度	定格電圧	定格電流
OY-4	連続	2.0 [kW]	2	1500 [rpm]	100 [V]	26 [A]

(b)

(a) 分巻電動機の回路図

(c) 分巻電動機の速度特性

電動機の定格値

定格出力	2.0 [kW]
極　数	2
定格回転速度	1500 [rpm]
定格電圧	100 [V]
定格電流	26 [A]

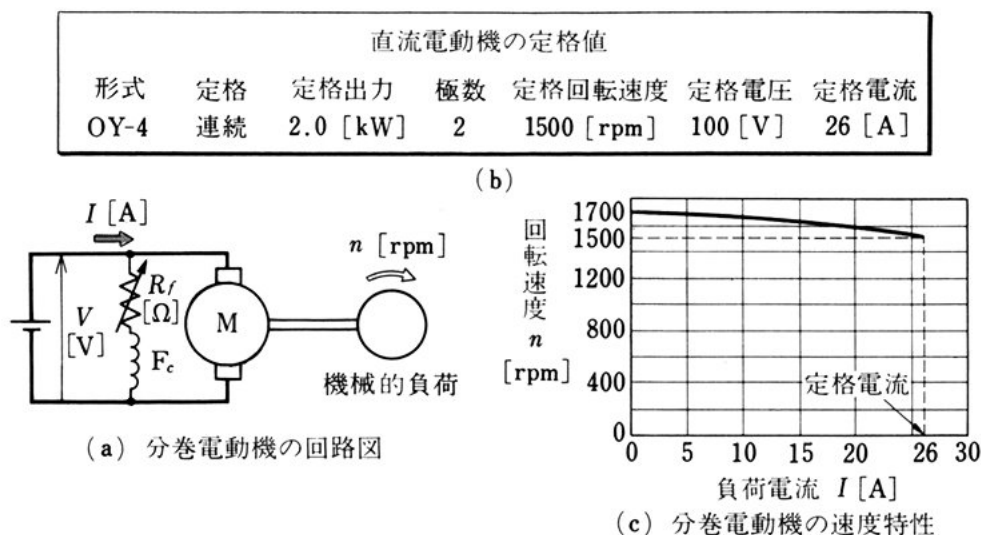
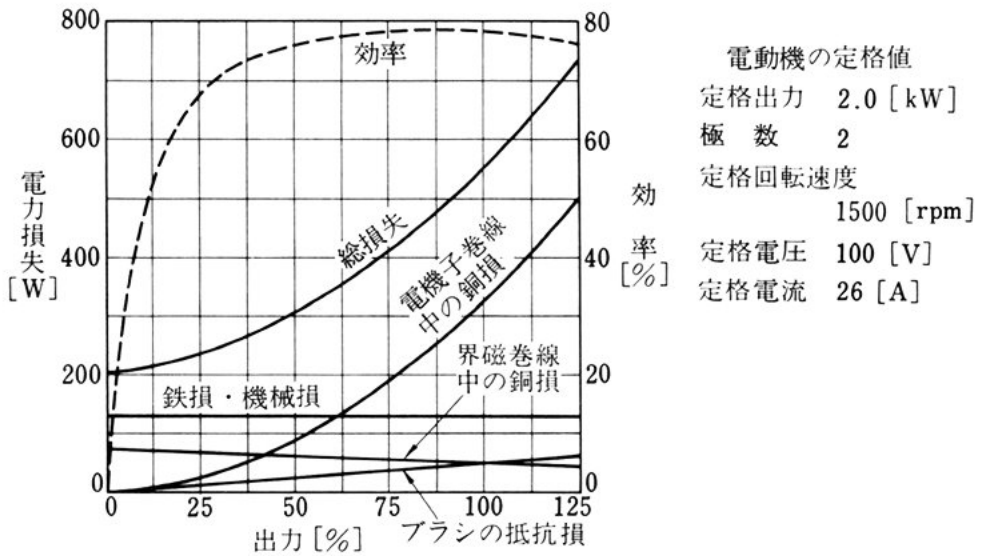



図 4　直流電動機の損失と効率

効　率　端子電圧 V [V] で，負荷電流 I [A] が流れると，電動機には $P_i(=VI)$ [W] の電力が供給される。そのとき，電動機の機械的出力が P_o [W] とすれば，電動機の**効率** η [%] は，次の式で表される。

$$\eta=\frac{P_o}{P_i}\times 100 \qquad (4)$$

図 4 に，分巻電動機の損失と効率を示す。

問 3.　図 3(c) の特性曲線から，速度変動率 ε [%] を求めよ。

問 4.　定格電圧 V が 100 [V]，定格出力 P_n が 5 [kW] の分巻電動機がある。全負荷における入力 P_i [W] および電機子電流 I_a [A] はいくらか。ただし，全負荷における電動機の効率 η は 83 [%]，界磁電流 I_f は 1 [A] とする。

問 題

1. 直流発電機において，定格電圧 V_n が 100［V］，無負荷電圧 V_0 が 105［V］であるという。電圧変動率 ε［%］はいくらか。

2. 直流電動機において，無負荷のときの回転速度 n_0 が 1500［rpm］，定格負荷のときの回転速度 n_n が 1450［rpm］であるという。速度変動率 ε［%］を求めよ。

3. 定格電圧 V が 100［V］，定格出力 P_o が 5［kW］の分巻発電機がある。定格出力における電機子反作用による電圧降下 v_a は 2.2［V］，ブラシの接触による電圧降下 v_b は 1.5［V］である。電圧変動率 ε［%］を求めよ。ただし，電機子巻線抵抗 R_a は 0.05［Ω］とし，界磁電流は無視する。

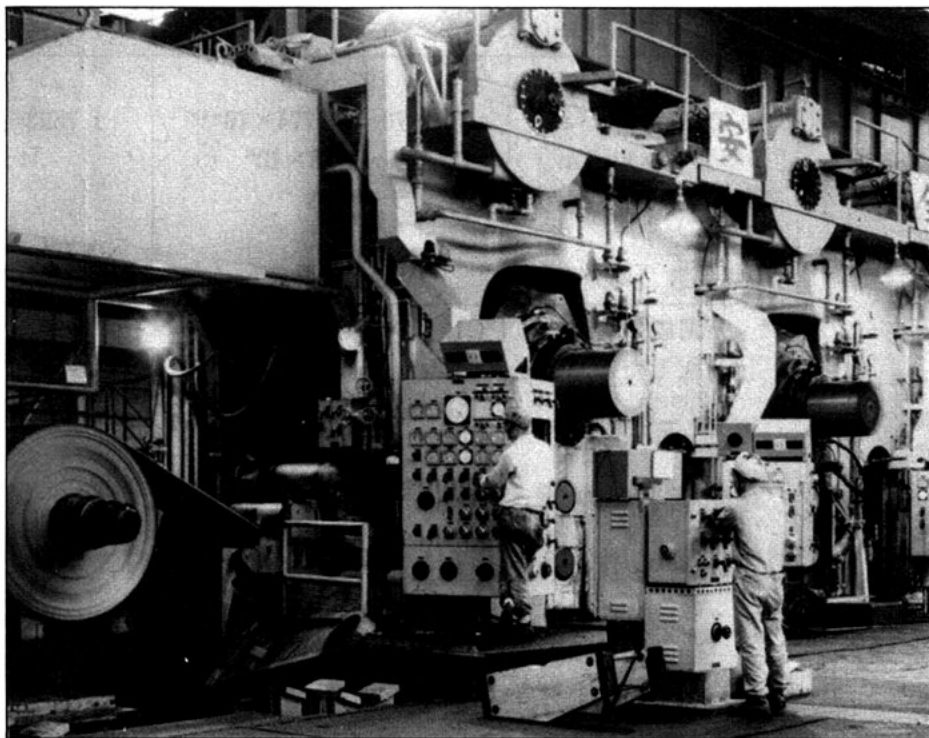
4. 分巻電動機がある。端子電圧 V が 200［V］，無負荷電流 I_0 が 8［A］，電機子の回路の抵抗 R_a が 0.1［Ω］，界磁回路の抵抗 R_f が 100［Ω］とすれば，負荷電流 I が 100［A］のとき，この電動機の効率 η［%］はいくらか。ただし，電機子反作用および界磁電流は無視する。

第2章

電気材料

ここまでに学んだ直流機の構造からわかるように，そこでは，電機子巻線などの導電材料，電機子鉄心などの磁性材料，コイルや整流子片を絶縁する絶縁材料などが用いられている。これらの材料は，電気材料とよばれ，直流機やあとで学ぶ変圧器・誘導機・同期機などを作る場合に不可欠のものである。

この章では，電気材料について調べる。

けい素鋼板の冷間圧延

1.　導　電　材　料

（1）　電　線　材　料

電圧降下が小さな状態で，電流を導く目的に使用される電線材料には，導電率の大きな銅線が使用されている。

電線に用いられる銅は，電気分解によって精練した**電気銅**で，99.99 [%] 程度の純度をもつ。銅を常温で引き伸ばすと，抵抗率が大きくなり硬くなる。これを**硬銅**という。硬銅は，回転機の整流子片，開閉器，送・配電線などに使われている。また，硬銅を 450〜600 [°C] で焼なましすると，抵抗率が減少し軟かくなる。これを**軟銅**という。軟銅は，電気機器の巻線やふつうの電線・コードなどに多く使われている。表1に軟銅線と硬銅線の性質を示す。

表1　銅線の性質　　(20[°C]における値)

項　　目	軟　銅　線	硬　銅　線
導電率　[%]*	97〜101	96〜98
抵抗率　[Ω・m]	$1.7070 \sim 1.7774 \times 10^{-8}$	$1.7593 \sim 1.7959 \times 10^{-8}$
引張強さ　[kgf/m²]	$25 \sim 29.5 \times 10^{6}$	$34 \sim 48 \times 10^{6}$
密　度　[g/cm³]	8.89	8.89
融　点　[°C]	1083	1083
弾性係数　[kgf/m²]	$5 \sim 12 \times 10^{9}$	$9 \sim 12.5 \times 10^{9}$

* 万国標準軟銅（20 [°C] における抵抗率 1.7241×10^{-8} [Ω・m]）の導電率を 100 [%] としたときの値。

（電気学会編「電気工学ハンドブック（1988）」による）

電気機器の巻線　絶縁性の被覆を施した電線を**絶縁電線**といい，電気機器に用いられる絶縁電線は，**巻線**または**マグネットワイヤ**とよばれる。巻線には軟銅線が多く用いられ，断面の形状が細いものには丸線，太いものには平角(ひらかく)線が用いられる。また，巻線は，通常，絶縁材料の耐熱性によって分類される。表2はその例である。A,

表 2 巻線の使用例

電気機器		絶縁の種類	許容最高温度[°C]	主な絶縁電線	備考
回転機		A E B F	105 120 130 155	ホルマール線 ポリウレタン線 ガラス巻線 ポリエステル線・ガラス巻線	ガラス巻線は中形機以上が多い。
変圧器	油入	A	105	ホルマール線・紙巻線	
	乾式	A H	105 180	ホルマール線 ポリエステルイミド線	

E, B, F, H は絶縁材料の種類を表し，それぞれの許容最高温度は，105 [°C]，120 [°C]，130 [°C]，155 [°C]，180 [°C] である。

エナメル線は，軟銅線の表面に絶縁性の塗料を焼きつけたもので，合成樹脂を被膜とした**ホルマール線**や，耐熱性の合性樹脂を被膜とした**ポリエステル線**および**ポリエステルイミド線**などがある。

ガラス巻線は，軟銅線の表面に無アルカリガラス糸を一重または二重に横巻きし，耐熱性の絶縁塗料を塗って焼きつけたもので，塗料の種類により，B 種，F 種および H 種がある。

紙巻線は，軟銅線の表面にクラフト紙またはマニラ紙を数層以上重ねて巻いたもので，導体としては平角線が多い。

問 1. 整流子片には軟銅を用いない。なぜか。

(2) 抵 抗 材 料

回路の電流を加減するための抵抗器に使用される抵抗材料としては，**コンスタンタン** (Cu-Ni 合金)，**ニクロム** (Ni-Cr 合金) などの抵抗線や抵抗帯が用いられ，大電流用には，鉄に少量の炭素やけい素またはアルミニウムを加えた**鋳鉄グリッド**が用いられる。

問 2. 電気機器の巻線に軟銅線が用いられるのはなぜか。

2. 磁 性 材 料

(1) 鉄

純鉄は，透磁率が大きく，飽和磁束密度も大きいので，磁性材料として優れているが，機械的にはあまり強くない。そこで，微量の炭素を含有させて機械的強さを増した軟鋼が，直流磁界の部分に用いられる。すなわち，直流機の磁極の鉄心などには鋼板（炭素量0.2～0.35［%］）が，直流機の継鉄などには鋳鋼品（炭素量0.2～0.3［%］）が用いられる。

(2) けい素鋼板

磁束が交番する鉄心などには，渦電流損とヒステリシス損からなる鉄損を生じる。そのような部分には，透磁率が大きく，鉄損の少ないけい素鋼板を，互いに絶縁して積み重ねて用いる。

表 3 無方向性電磁鋼帯の磁気特性の例

種 類	厚 さ [mm]	密 度 [kg/m³]	鉄損（最大値） $W_{15/500}$ [W/kg]	磁束密度(最小値) B_{50} [T]
35 A 230	0.35	7.60 ×10³	2.30	1.60
35 A 270		7.65	2.70	1.60
35 A 440		7.70	4.40	1.64
50 A 270	0.50	7.60	2.70	1.60
50 A 310		7.65	3.10	1.60
50 A 470		7.70	4.70	1.62
65 A 800	0.65	7.80	8.00	1.66
65 A 1300		7.85	13.00	1.69

鉄損の $W_{15/500}$ は，周波数 50［Hz］，最大磁束密度 1.5［T］における鉄損を示す。
磁束密度の B_{50} は，磁化力 5000［A/m］における磁束密度を示す。
種類を示す記号（例えば 35 A 230）の最初の 2 けたの数字は，厚さ［mm］を 100 倍した値を，次の A は無方向性電磁鋼帯を示す。次の 3～4 けたの数字は，鉄損の最大値を 100 倍した値である。

（JIS C 2552-1986 による）

表 4 方向性けい素鋼帯の磁気特性の例

種 類	厚 さ [mm]	密 度 [kg/m³]	鉄損(最大値) $W_{17/50}$ [W/kg]	磁束密度(最小値) B_8 [T]
27 P 100	0.27	×10³ 7.65	1.00	1.85
27 G 120			1.20	1.78
30 P 110	0.30		1.10	1.85
30 G 130			1.30	1.78
35 P 125	0.35		1.25	1.85
35 G 145			1.45	1.78

鉄損の $W_{17/50}$ は,周波数 50 [Hz],最大磁束密度 1.7 [T] における鉄損を示す。
磁束密度の B_8 は,磁化力 800 [A/m] における磁束密度を示す。
種類を示す記号の G は配向性が普通のもの,P は配向性が高いものを表す。配向性とは,結晶粒子の磁化しやすい方向がそろう性質である。

(JIS C 2553-1986 による)

けい素鋼板は,渦電流損を少なくするために,薄板状にし,純鉄にけい素(3.5 [%] 以下)を入れて抵抗率を大きくしている。また,ヒステリシス損を少なくするために,鉄の純度を高くし,内部のひずみを少なくしている。

けい素鋼板には,無方向性のものと,方向性のものとがある。前者は **無方向性けい素鋼帯** とよばれるもので,冷間圧延によって作られ,結晶粒が等方向に配向したものである。表 3 は,無方向性けい素鋼(電磁鋼)帯の磁気特性の例である。後者は**方向性けい素鋼帯**とよばれるもので,同じく冷間圧延によって作られ,結晶粒が圧延方向に配向したものである。表 4 は,方向性けい素鋼帯の磁気特性の例である。

問 3. けい素鋼板で,種別が同じでも,鋼帯が厚いと鉄損が大きくなるのはなぜか。また,種類によって用途が異なるのはなぜか。

問 4. 冷間圧延けい素鋼帯と方向性けい素鋼帯の違いを簡潔に述べよ。

3. 絶 縁 材 料

(1) 絶縁材料の許容最高温度と用途

電気機器を長い間使用していると，絶縁材料がしだいに劣化して，絶縁耐力や絶縁抵抗が減少し，ついには使用できなくなる場合がある。この絶縁劣化の原因は，いろいろ考えられるが，中でも使用中の機器の温度上昇による場合が最も多い。 5

表 5 許容最高温度による絶縁材料の分類

絶縁の種類	許容最高温度[°C]	絶縁材料の種類
Y	90	例えば，木綿・絹・紙などの材料で構成され，ワニス類を含浸せず，また，油中に浸さないもの
A	105	例えば，木綿・絹・紙などの材料で構成され，ワニス類で含浸したものまたは油中に浸したもの，エナメル線用ポリビニルホルマール・油性ワニス・絶縁油など
E	120	A種より耐熱性の優れた合成有機材料，例えば，ポリエチレンテレフタレートフィルム・エナメル線用エポキシ樹脂など
B	130	例えば，マイカ・石綿・ガラス繊維などの無機材料を接着材料とともに用いたもの，ワニスガラスクロス・ワニスアスベスト・エナメル線用けい素樹脂など
F	155	例えば，マイカ・石綿・ガラス繊維などの無機材料をシリコーンアルキド樹脂などの接着材料とともに用いたもの，ワニスガラスクロス・ワニスアスベストなど
H	180	例えば，マイカ・石綿・ガラス繊維などの無機材料をけい素樹脂または同等以上の耐熱性接着材料とともに用いたもの，ゴム状および固体状のけい素樹脂または同等の性質をもった材料を単独に用いた場合を含む，ワニスガラスクロスなど
C	180超過	例えば，マイカ・石綿・磁器などを単独で用いたもの，または接着材料とともに用いたもの

(JIS C 4003-1977による)

運転中の機器は，導体に流れる電流によるジュール熱，絶縁材料中の誘電損や漏れ電流による発熱，鉄心中の鉄損による発熱などによって温度が上昇する。そこで，絶縁材料には，その種類に応じて許される最高の使用温度が定められている。この温度を**許容最高温度**という。なお，我が国では，周囲温度の基準値は，ふつう40 [°C]と定められ，その絶縁部分の温度上昇限度は，次の式で表される。

温度上昇限度≦許容最高温度－40 [°C]

絶縁材料は，表5に示すように，許容最高温度によって，Y種からC種までの7種に分類される。

電気機器に用いられる絶縁材料は，その形態からみると，固体・液体・気体のものがあり，その種類はきわめて多い。表6は，機器の絶縁の種類に応じて使用される主な絶縁材料を示す。ここで，回転機の絶縁についてみると，直流機ではB種とF種絶縁が，誘導機(第4章参照)では，E種，B種およびF種絶縁が用いられ，ともに中形

表 6　絶縁材料の使用例

電気機器		絶縁の種類	許容最高温度[°C]	主な絶縁材料
回転機		A	105	ワニスクロス・油性ワニス
		E	120	ポリエチレンテレフタレートフィルム・不飽和ポリエステル系ワニス
		B	130	フレキシブルマイカ・マイカテープ・ガラステープ・アルキド樹脂系ワニス
		F	155	ポリイミドフィルム・ポリアミドペーパ・ガラステープ・エポキシ樹脂系ワニス
変圧器	油入	A	105	プレスボード・フェノール樹脂系ワニス・絶縁油
	乾式	A	105	ワニスクロス・フェノール樹脂系ワニス
		H	180	シリコーンガラスマイカ・シリコーンガラステープ・シリコーンワニス

機以上では主にF種絶縁が用いられる。同期機（第5章参照）では，B種絶縁が用いられるが，F種絶縁も実用化されてきた。なお，回転機では，A種絶縁は現在ほとんど用いられていない。また，変圧器（第3章参照）では，巻線の絶縁と冷却を兼ねて，主に絶縁油入りであるので，A種絶縁が用いられる。とくに油による火災の拡大を極度にきらう場所では，乾式のH種絶縁が用いられるが，電圧のあまり高くない中容量の変圧器までである。乾式のA種絶縁は，電圧の低いごく小容量の電子機器用変圧器などに用いられる。

問 5.　A種とH種の絶縁材料では，どちらが高温に耐えられるか。

（2）　固体絶縁材料

一般に固体絶縁材料は，気体絶縁材料，液体絶縁材料に比べ，絶縁破壊の強さが高い。固体絶縁材料には，繊維質絶縁材料，無機質絶縁材料，樹脂系絶縁材料などがある。

繊維質絶縁材料　　**マニラ紙**は，マニラ麻を原料とした紙で，機械的に強いが高価である。**クラフト紙**は，針葉樹を処理するクラフトパルプを原料とした紙で，代表的な絶縁紙である。**プレスボード**は，木綿やクラフトパルプを原料とし，圧縮し乾燥して作った厚い絶縁紙で，油入変圧器の絶縁に用いられる。

無機質絶縁材料　　**マイカ**は，薄くはがれる性質があり，とくに熱に強いので，その加工品は，耐熱用絶縁材料の代表的なものである。**フレキシブルマイカ**は，はがしマイカを耐熱性接着剤ではりあわせたものである。**マイカテープ**は，絶縁薄紙の間に，はがしマイカをはりあわせて，テープ状に作ったものである。**ガラス繊維**は，無アルカリガラスを繊維状としたもので，耐熱性に優れている。耐熱性のワニス処理をして，電線の被覆，ガラスクロス・ガラステープとして用いられる。

樹脂系絶縁材料　合成樹脂の絶縁材料である。合成樹脂は，化学的に合成して得られる分子量がきわめて大きな有機化合物で，その種類は非常に多い。**ポリビニルホルマール**は，耐油・耐アルカリ性に優れ，金属との接着もよく，被膜が著しく丈夫なので溶剤で溶かしてホルマール線の焼きつけ塗装に用いる。**ポリエチレンテレフタレート**は，一般に**マイラ**とよばれ，薄いフィルム状にすることができ，機械的に丈夫で吸水性がなく，耐熱性もかなりよいので，回転機のスロット絶縁などに用いられる。

フェノール樹脂は，ふつう**ベークライト**として知られ，合成樹脂のうち最も古くから用いられている。吸湿性があり，電気的特性はあまり良好ではないが，成型品や積層品は機械的に丈夫で，加工しやすく，安価であるので，広く用いられる。また，溶剤に溶かしてワニスとして用いられる。**アルキド樹脂**は，広義のポリエステル系樹脂で，機械的強さと耐熱性に優れており，耐熱塗料として用いられることが多く，ポリエステル線の被膜に用いられている。**不飽和ポリエステル**は，使用直前に硬化促進剤を加えると，室温またはわずかの加熱で硬化するので，速硬化性のワニスなどに用いられる。**ポリアミド**は，**ナイロン**ともよばれ，人造繊維として広く用いられる。耐熱性にしたナイロンの**ポリアミドペーパ**は，**ノーメックス**として知られ，F種絶縁に用いられる。**ポリイミド**は，耐湿・耐熱性に優れ，薄いフィルムにした**ポリイミドフィルム**は，**カプトン**として知られ，F種絶縁に用いられる。**ポリアミドイミド**は，とくに耐熱性に優れているので，耐熱電線のポリアミドイミド線の被膜などに用いられる。

エポキシ樹脂は，機械的に強さと耐熱性がとくに優れており，硬化促進剤を加えると速硬化性になるので，F種絶縁のワニスなどにも用いられる。**シリコーン樹脂**は，耐湿・耐熱性にきわめて優れており，

溶剤に溶かしてH種絶縁のワニスや接着剤に用いられる。**シリコーンガラスマイカ**は，ガラスクロスにマイカを接着したものである。

油性ワニスは，乾燥性植物油を主成分とするもので，合成樹脂系ではない。耐油性に富むが乾燥性はあまりよくなく，現在ではほとんど用いられない。**ワニスクロス**は，綿布に油性ワニスを含浸し乾燥したものである。

（3） 液体絶縁材料・気体絶縁材料

原油から精製された鉱油は，絶縁耐力が高く，**絶縁油**として変圧器などに用いられる。**六ふっ化硫黄**（いおう）(SF_6)は，不燃性の気体で，約2気圧（0.2 [MPa]）で鉱油と同じくらいの絶縁耐力をもち，遮断器や乾式変圧器などに用いられる。

問　題

1. 電気機器の絶縁材料について，次の問いに答えよ。

(1) H種絶縁材料はどんなもので，どんなところに利用されているか。

(2) B種絶縁材料の許容最高温度は何度か。

(3) Y種とA種はどこが違うか。　(4) 磁器は何種に属するか。

2. 回転機ではA種絶縁は用いられずF種絶縁が用いられる。なぜか。

3. マイラ，カプトン，ノーメックスは何種の絶縁物か。

4. SF_6 ガス絶縁変圧器は，H種絶縁乾式変圧器より大容量・高電圧のものが製作されている。その理由を考えよ。

5. 電気機器に使われている絶縁材料のうち，次の①～④の種類について，その種別および許容最高温度を答えよ。

① ベークライト，マイラ

② 油中に浸したワニスを含浸したプレスボード

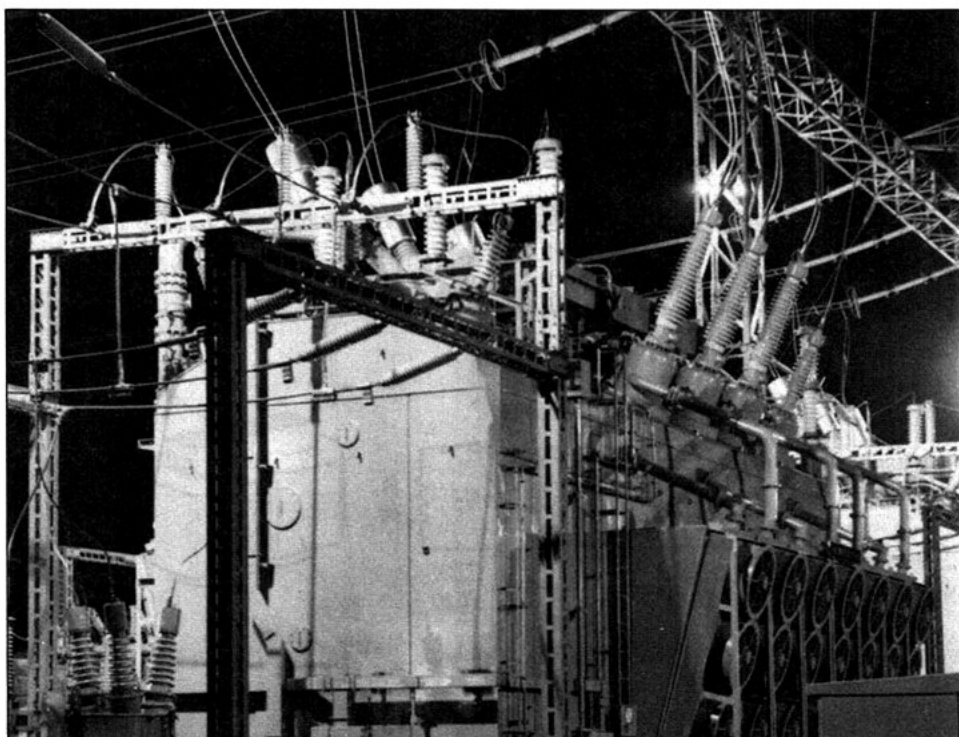
③ マイカなどを接着材料とともに用いたもの

④ ガラス繊維などをシリコーン樹脂とともに用いたもの

第3章

変圧器

変圧器は，電磁誘導によって，交流電圧を高くしたり，低くしたりすることができる。これによって，電力を効率よく送ることができるので，送電・配電には欠くことができない主要な機器である。また，小容量の変圧器は，いろいろな電気負荷設備,通信・計測・制御用電気設備などの内部にも広く用いられている。

この章では，変圧器の構造・等価回路・特性・結線ならびに，いろいろな変圧器について調べる。

変圧器

1　変圧器の構造と等価回路

この節の目標　変圧器は，相互誘導を利用して電圧を変えるもので，電流を流すための一次コイル，二次コイル，磁束を通りやすくするための鉄心から構成される。

ここでは，その構造と材料について調べ，さらに，これを一つの電気回路とみた場合に，どのような等価回路で表せるかについて調べる。

1. 変圧器の構造

(1) 変圧器の回路と構造

変圧器 (transformer) は，図1(a)に示すように，鉄心に巻線（コイル）を巻いたものであり，電源側とつなぐ巻線を**一次巻線** (primary winding)，負荷側につなぐ巻線を**二次巻線** (secondary winding) という。一次巻線（巻数 N_1）に電圧 V_1 [V] を加えると，相互誘導の働きによって，二次巻線（巻数 N_2）には巻数に比例する電圧 V_2 [V]（＝

図1　変圧器の回路と構造

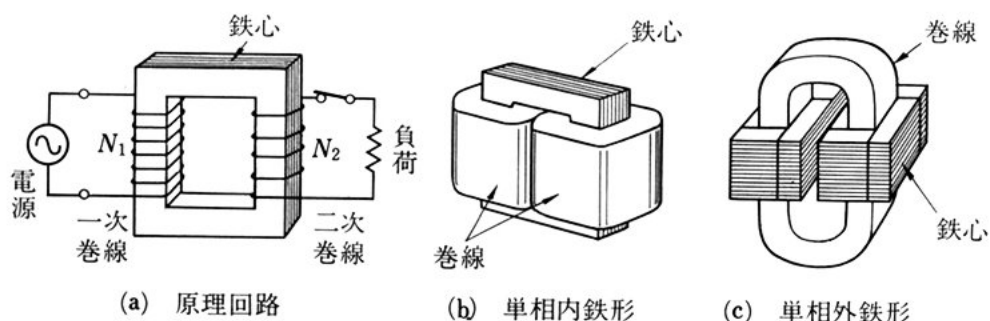
(a) 原理回路　(b) 単相内鉄形　(c) 単相外鉄形

$\frac{N_2}{N_1} V_1$ [V]) が発生する。また，巻線のつなぎ方を電源側と負荷側と入れ換えると，巻数の比が逆になり，電圧の比も逆になる。

図 3 に示す柱上変圧器など電力用の変圧器は，ふつう，鉄心と巻線の部分を容器に収め，絶縁油に浸している。

鉄心には優れた磁化特性をもち，鉄損の少ないけい素鋼板を積み重ねて用いる。巻線は電気回路を構成し，鉄心は磁気回路を構成している。

内鉄形と外鉄形　鉄心に巻線を巻く場合，構造的にみて図 1 (b), (c) に示すような内鉄形と外鉄形に分けられる。**内鉄形**は，巻線が二分されているため絶縁が容易であり，高電圧・大容量のものに適している。**外鉄形**は，小形変圧器など低電圧用のものに用いられる。

(2) 鉄　　心

変圧器の鉄心には，飽和磁束密度と透磁率が大きく，鉄損の少ない材料が用いられる。一般に広く用いられている材料は，ヒステリシス損を減少させるためにけい素を含有させ，その含有量が 3.5 [%] 程度の G 級けい素鋼板である。G 級けい素鋼板は，方向性けい素鋼帯で，一方向だけ磁束を通しやすい性質がある。また，1 枚 1 枚のけい素鋼板の表面に施してある絶縁被膜が，渦電流の流れるのを防ぐ働きをしている。

占積率　けい素鋼板の表面は，絶縁被膜でおおわれているので，図 1 (b), (c) に示すように，鋼板を積み重ねて成層鉄心とする場合には，磁束を通す鉄心の有効断面積と，実際に占める断面積とは異なる。その比を**占積率**という。占積率は一般に 96 [%] 程度である。

鉄心の構造　ふつうの変圧器の鉄心には，**短冊鉄心**(たんざく)とよばれる，短冊形けい素鋼板を積み重ねた成層鉄心が用いられる。その組み立ては，図 2 (a) に示すようにして行う。鉄心の接続には，図 (b), (c) の

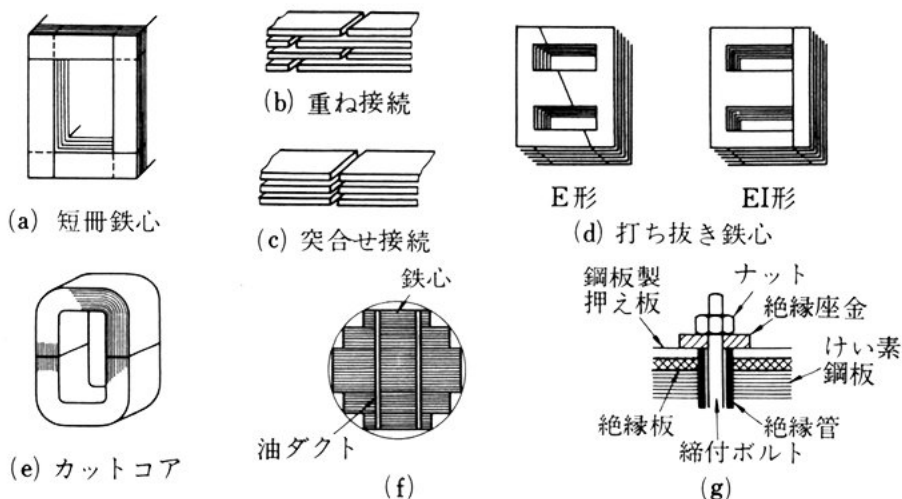



図2　鉄　心

ように，重ね接続・突合せ接続がある。**打ち抜き鉄心**は，通信機用小形変圧器の鉄心に用いられ，図(d)のように，鋼板を打ち抜いたものが多い。**巻鉄心**は，継目のない方向性けい素鋼帯を巻いた鉄心で，短冊鉄心に比べて，励磁電流や鉄損が小さくてすみ，鉄心も軽くできる。主に柱上変圧器などの小形変圧器に用いられる。図(e)は巻鉄心の例である。鉄心全体を合成樹脂で接着したあと2か所で切断し，巻線をはめ込んだ後，圧力を加えて突合せ接続にして用いるもので，**カットコア**とよばれる。

変圧器が発熱するのは，鉄損や銅損などのためであって，図3(a)に示すように，変圧器本体を油中に浸して冷却しているものが多い。大形の変圧器では，鉄心中を油がよく通るようにするために，図2(f)に示すように，鉄心中に油ダクトを設けているものがある。

成層鉄心を一体とするためには，図(g)に示すように，押え板やボルトを通して渦電流が流れないように，絶縁した締付ボルトで固定する。また，けい素鋼板を接着剤で張り合わせて，ボルトの数を少なくする方法もとられている。

問 1. 変圧器の鉄心には，厚さ 0.35 [mm] のけい素鋼板が用いられる。けい素鋼が用いられるのはなぜか。また，薄板状の材料を重ねて用いるのはなぜか。

(3) 巻　　線

図 3 (b) に示すように，一般に，変圧器には高圧巻線と低圧巻線が施されている。

巻線には，導電材料として軟銅線が用いられ，形状によって丸線と平角線がある。中形および大形の変圧器では，平角裸銅線に絶縁テープを巻き付けたものが用いられる。小形の変圧器で，巻線の電圧が低く，細い丸線を用いる場合は，ホルマール線を使用する。

巻線の方法には，小形の変圧器では，図 4 (a) に示すように，鉄心

図 3 変圧器の例 (柱上変圧器)

単 相 変 圧 器

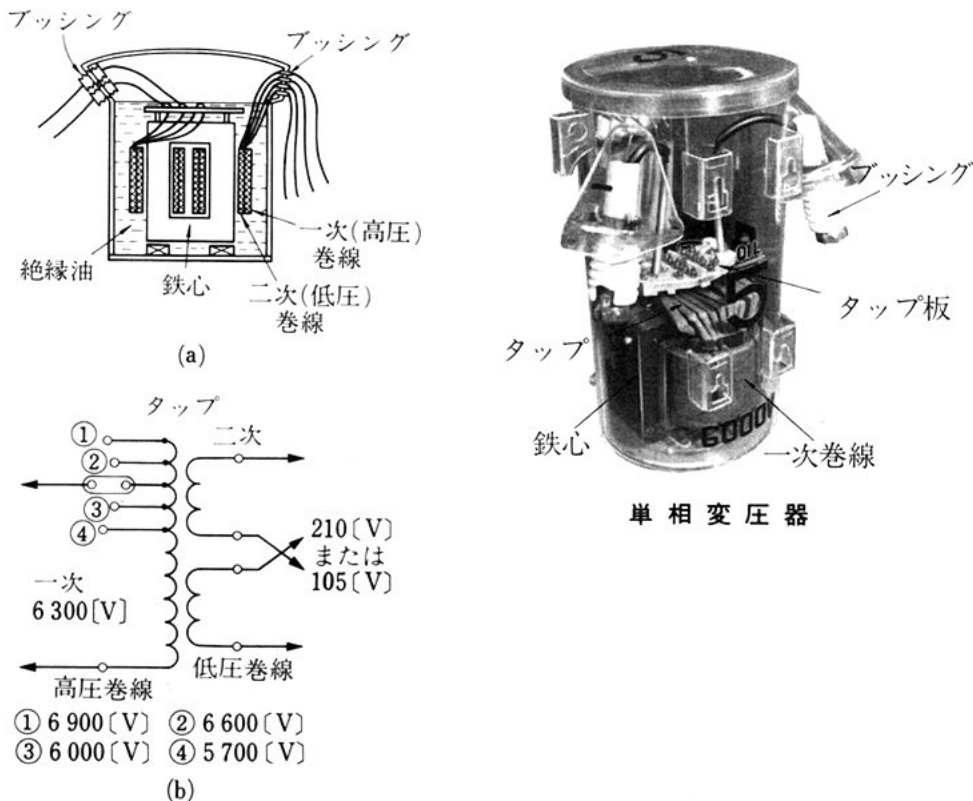
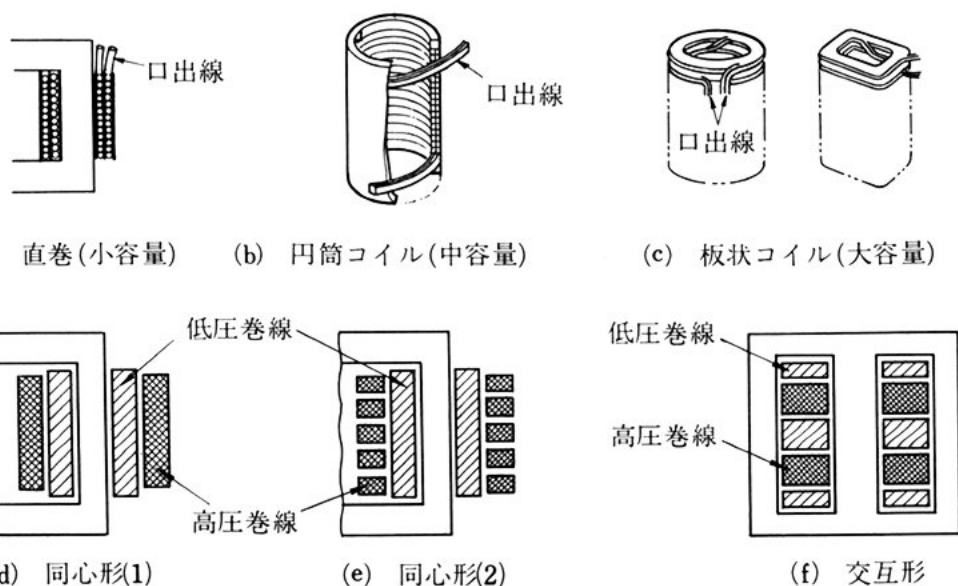



図 4 巻線とその配置

に絶縁を施し，その上に巻線を直接巻き付ける方法があるが，容量が大きくなると作業が困難になる。中形および大形の変圧器では，図 4 (b), (c) に示す円筒コイルや板状コイルとして，これを鉄心にはめ込む方法がとられている。

このような巻線を鉄心に対して配置する場合には，図 (d), (e), (f) に示すように，巻線を分割したり，低圧側が鉄心の近くにくるようにする。また，一次巻線と二次巻線の間や，巻線と鉄心の間の絶縁には，図 (d), (e) の同心形では，クラフト紙を巻いてフェノール樹脂で固めた絶縁筒などが用いられ，図 (f) の交互形では，ワニス処理をしたプレスボードを何枚も重ねたものが用いられる。

問 2. 電気回路と磁気回路からなる変圧器を作るには，電線材料・磁性材料のほかに，どのような電気材料が必要か。

問 3. 巻線の絶縁にはどのような工夫がなされているか，調べてみよ。

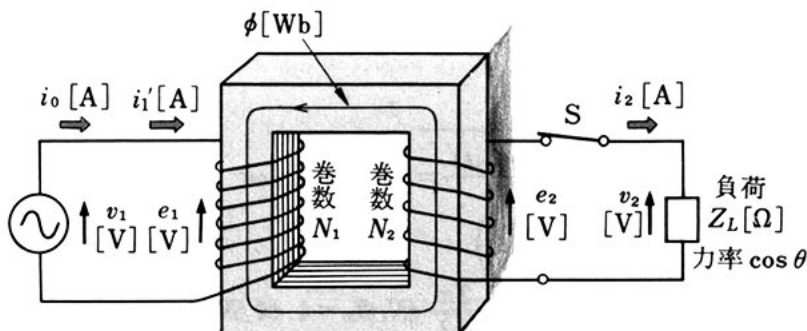
2. 変圧器の電圧・電流

(1) 理想変圧器の電圧・電流・磁束

一次・二次巻線の抵抗や鉄損を無視した変圧器を**理想変圧器**という。理想変圧器は，実際に作ることはできないが，変圧器の動作を知るうえで重要である。

図5において，一次巻線（巻数N_1）に電圧v_1［V］が加わると，一次側に電流i_0［A］が流れ，鉄心中には大きさと向きが周期的に変化する磁束ϕ［Wb］が生じる。そのため，一次巻線および二次巻線（巻数N_2）には，起電力e_1［V］，e_2［V］が誘導される。

図5において，スイッチSを閉じると，起電力e_2［V］によって，二次回路には電流i_2［A］が流れる。また，電流i_2［A］によって起磁力N_2i_2［A］が生じ，磁束ϕ［Wb］は減少しようとするが，ϕの最大値Φ_m［Wb］が一定値を保つように一次側には電源から補償電流（一次負荷電流）i_1'［A］が流入してN_2i_2［A］の起磁力を打ち消す。すなわち，i_1'［A］とi_2［A］との間には，$N_1i_1'=N_2i_2$の関係がある。また，一次回路の電流i_1［A］はi_0［A］とi_1'［A］との合成電流であり，$i_1=i_0+i_1'$となる。ここで，e_1［V］を**一次誘導起電力**，e_2［V］を

図 5 理想変圧器の電圧・電流

二次誘導起電力，i_1 [A] を**一次電流**，i_2 [A] を**二次電流**といい，i_0 [A] を**励磁電流**という。

無負荷時の電圧・電流・磁束　図5においてスイッチを開いている場合の電圧・電流の関係をベクトル図で示すと，図6(a)のようになる。すなわち，一次側に加える電圧 $\dot{V}_1$ [V] より $\dfrac{\pi}{2}$ [rad] 位相の遅れた励磁電流 $\dot{I}_0$ [A] が一次巻線に流れ，鉄心中に $\dot{I}_0$ [A] と同相の磁束 $\dot{\varPhi}_m$ [Wb] が生じ，その磁束によって，それより $\dfrac{\pi}{2}$ [rad] 位相の進んだ起電力 $\dot{E}_1$ [V]，$\dot{E}_2$ [V] が，一次巻線および二次巻線に誘導される。

この場合，鉄心中の磁束の最大値を $\varPhi_m$ [Wb] とすれば，次の関係がなりたつ。

$$\left.\begin{aligned} E_1 &= \frac{1}{\sqrt{2}}\varPhi_m\omega N_1 = 4.44\,fN_1\varPhi_m{}^* \\ E_2 &= \frac{1}{\sqrt{2}}\varPhi_m\omega N_2 = 4.44\,fN_2\varPhi_m \\ \text{ゆえに，}\quad \frac{E_1}{E_2} &= \frac{N_1}{N_2} \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

負荷時の電圧・電流　図5において，スイッチSを閉じて二次巻線に負荷 $\dot{Z}_L$ [Ω]（力率 $\cos\theta$）を接続すると，図6(b)に示すように，起電力 $\dot{E}_2$ [V] によって負荷電流 $\dot{I}_2$ [A] が流れ，一次側には電流 $\dot{I}_1'$ [A] が流れる。一次回路・二次回路の電圧の比および電流の比は，次の式で表される。

---

*　$e_1 = N_1\dfrac{d\phi}{dt} = N_1\dfrac{d(\varPhi_m\sin\omega t)}{dt} = \omega N_1\varPhi_m\cos\omega t$

$= -\omega N_1\varPhi_m\sin\left(\omega t - \dfrac{\pi}{2}\right)$

ゆえに，$E_1 = \dfrac{1}{\sqrt{2}}\omega N_1\varPhi_m = \dfrac{2\pi}{\sqrt{2}}fN_1\varPhi_m = 4.44\,fN_1\varPhi_m$

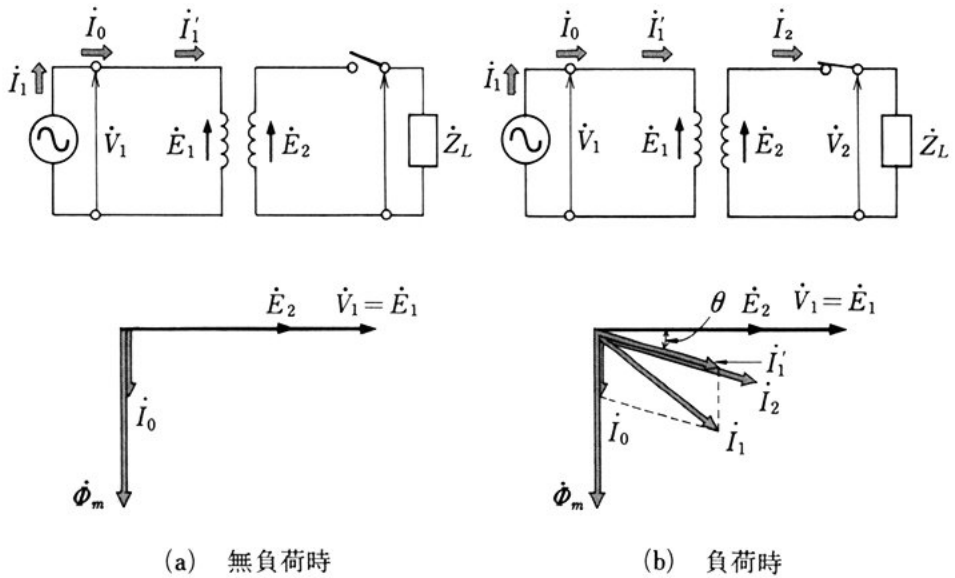



図 6 理想変圧器の電圧・電流とベクトル図

$$\frac{E_1}{E_2}=\frac{N_1}{N_2}=\frac{I_2}{I_1'}=a \qquad (2)$$

ここで，巻数の比 $\dfrac{N_1}{N_2}=a$ を変圧器の**巻数比**（turn ratio）という。

問 4． 巻数が $N_1=2520$，$N_2=84$ の変圧器に，$V_1=6300$ [V] の電圧が加わっている。二次誘導起電力 E_2 [V] を求めよ。また，二次端子に 5 [Ω] の負荷をつないだときの二次電流 I_2 [A] および一次電流 I_1 [A] を求めよ。ただし，励磁電流は無視するものとする。

問 5． 問 4 において，電源の周波数 f が 50 [Hz] であるとき，最大磁束 Φ_m [Wb] を求めよ。もし同一磁束で 60 [Hz] の変圧器を設計すると，巻数 N は 50 [Hz] のときと比べて，何パーセント少なくてよいか。

（2） 実際の変圧器の電圧・電流・磁束

実際の変圧器では，一次・二次巻線には抵抗があり，鉄心中には鉄損がある。さらに，一次巻線の電流による磁束は，すべて二次巻線と鎖交するとは限らない。

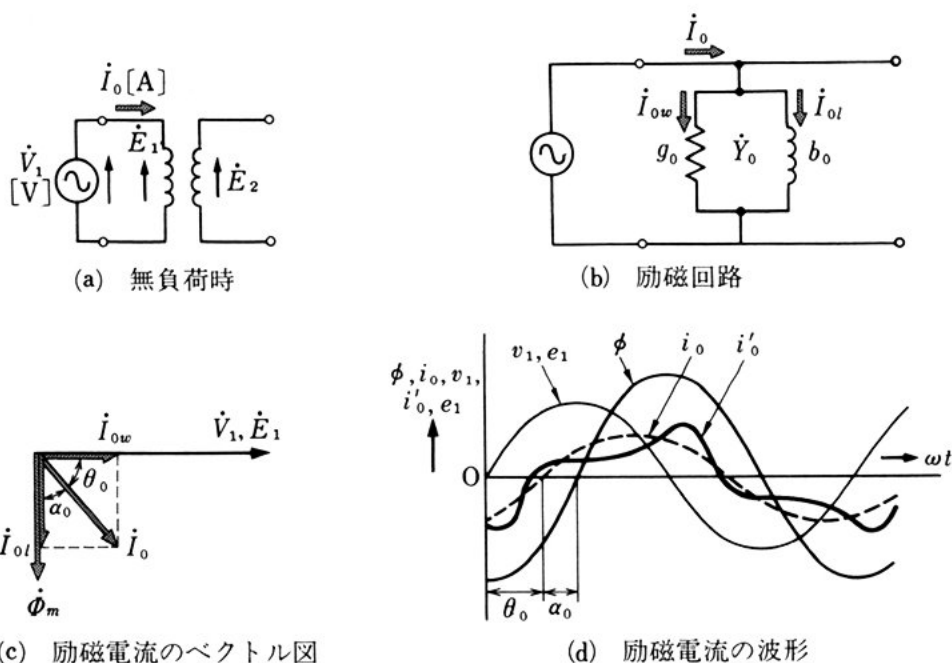



図 7　実際の変圧器の電圧・励磁電流

励磁電流　実際の変圧器では，一次巻線に交流電圧を加えると，鉄心の磁気飽和現象やヒステリシス現象が生じるので，励磁電流は，図 7(d) の i_0' [A] のような非正弦波交流となる。ふつう，これと実効値が等しい正弦波交流 i_0 [A] で表して取り扱う。理想変圧器では，i_0 [A] は v_1 [V] より位相が $\frac{\pi}{2}$ [rad] 遅れると考えたが，実際の変圧器では，ヒステリシス損・渦電流損などの鉄損のために，位相の遅れ θ_0 は $\left(\frac{\pi}{2}-\alpha_0\right)$ [rad] となる。

図 (d) の v_1 [V]，e_1 [V]，i_0 [A] をベクトル図で示すと，図 (c) となる。励磁電流 $\dot{I}_0$ [A] は，一次電圧 $\dot{V}_1$ [V] と同相な成分 $\dot{I}_{0w}$ [A] および，鉄心中の磁束 $\dot{\Phi}_m$ [Wb] と同相な成分 $\dot{I}_{0l}$ [A] に分けて考えることができる。$\dot{I}_{0w}$ [A] を**鉄損電流**といい，$\dot{I}_{0l}$ [A] を**磁化電流**という。

図 7(a) の励磁回路に，$\dot{I}_{0w}$ [A]，$\dot{I}_{0l}$ [A] の二つの電流が流れているとすれば，その等価回路は，図 7(b) で示される。$\dot{Y}_0$ [S] を**励磁ア**

ドミタンス，g_0 [S] を**励磁コンダクタンス**，b_0 [S] を**励磁サセプタンス**という。この回路は，変圧器の励磁回路の等価回路である。

以上のことを式で示すと，次のようになる。

$$\cos\theta_0=\frac{I_{0w}}{I_0}=\frac{\text{鉄損}}{V_1I_0}=\cos\left(\frac{\pi}{2}-\alpha_0\right)=\sin\alpha_0 \qquad (3)$$

5

$$\dot{Y}_0=g_0-jb_0=\frac{\dot{I}_0}{\dot{V}_1} \qquad (4)$$

$$g_0=\frac{I_{0w}}{V_1}=\frac{I_{0w}V_1}{V_1^2}=\frac{\text{鉄損}}{V_1^2} \qquad (5)$$

$$b_0=\frac{I_{0l}}{V_1}=\frac{I_{0l}V_1}{V_1^2}=\frac{\text{無効電力}}{V_1^2} \qquad (6)$$

例題 1.　一次電圧 V_1 が 2000 [V] で，励磁コンダクタンス g_0 が 0.00018 [S]，励磁サセプタンス b_0 が 0.00091 [S] であるとい

10　う。鉄損電流 I_{0w} [A]，磁化電流 I_{0l} [A]，励磁電流 I_0 [A]，$\cos\theta_0$ を求めよ。

解答　$I_{0w}=g_0V_1=0.00018\times2000=0.36$ [A]

$I_{0l}=b_0V_1=0.00091\times2000=1.82$ [A]

$I_0=\sqrt{0.36^2+1.82^2}=\sqrt{3.442}=1.86$ [A]

15　$\cos\theta_0=\dfrac{I_{0w}}{I_0}=\dfrac{0.36}{1.86}=0.194$

巻線の抵抗と漏れリアクタンス　実際の変圧器では，一次巻線も二次巻線もそれぞれ抵抗 r_1 [Ω]，r_2 [Ω] をもっている。また，図8(a)のように，一次・二次巻線を貫く磁束（主磁束）のほかに漏れ磁束がある。漏れ磁束の効果は，図8(b)のように，x_1 [Ω]，x_2 [Ω] で

20　示すリアクタンス，すなわち**漏れリアクタンス**で表すことができる。

(a) 変圧器の漏れ磁束

(b) 抵抗，漏れリアクタンスと理想変圧器

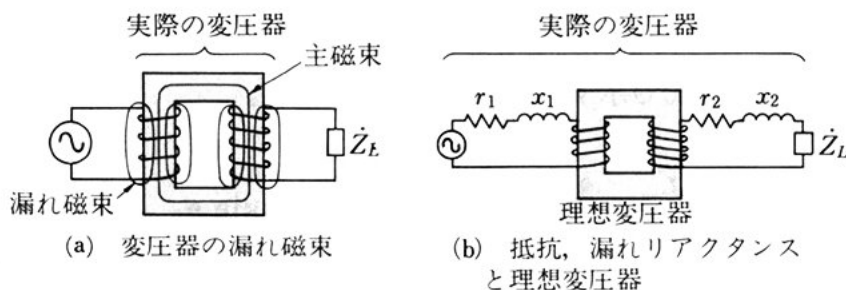



図 8 実際の変圧器の漏れ磁束

3. 変圧器の等価回路

変圧器の電気的な特性を考える場合，等価回路を利用すると都合がよい。とくに簡易な等価回路は，計算が簡略にできるので，広く利用されている。

(1) 等価回路とベクトル図

一次・二次巻線の抵抗 r_1 [Ω], r_2 [Ω], 漏れリアクタンス x_1 [Ω], x_2 [Ω], および励磁コンダクタンス g_0 [S], 励磁サセプタンス b_0 [S], または励磁アドミタンス $Y_0\ (=g_0+jb_0)$ [S] で表した回路を変圧器の**等価回路**という。

図 9(a) の等価回路において，$\dot{Z}_1=r_1+jx_1$ [Ω] を**一次インピーダンス**といい，$(r_1+jx_1)\dot{I}_1$ [V] を**一次インピーダンス降下**という。また，$\dot{Z}_2=r_2+jx_2$ [Ω] を**二次インピーダンス**といい，$(r_2+jx_2)\dot{I}_2$ [V] を**二次インピーダンス降下**という。

この回路の電圧と電流の間には，次の関係がある。

$$\left.\begin{aligned}\dot{V}_1&=\dot{E}_1+r_1\dot{I}_1+jx_1\dot{I}_1\\ \dot{E}_2&=\dot{V}_2+r_2\dot{I}_2+jx_2\dot{I}_2\end{aligned}\right\}$$

$$
\left.
\begin{aligned}
&\dot{V}_2=\dot{Z}_L\dot{I}_2=(R_2+jx_2)\dot{I}_2\\
&\quad \dot{V}_2 \text{ と } \dot{I}_2 \text{ の位相差は } \theta\ [\text{rad}]\\
&\dot{I}_1=\dot{I}_0+\dot{I}_1'\\
&\quad \dot{E}_1 \text{ と } \dot{I}_0 \text{ の位相差は } \left(\frac{\pi}{2}-\alpha_0\right)[\text{rad}]\\
&\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2}=a=\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1'}
\end{aligned}
\right\} \quad (7)
$$

式（7）から電圧と電流のベクトル図をかくと，図 9(b) となる。

問 6. 一次誘導起電力 E_1 が 2000 [V]，二次誘導起電力 E_2 が 100 [V] の実際の変圧器で，一次巻線および二次巻線の抵抗と漏れリアクタンスが $r_1=0.22$ [Ω]，$r_2=0.0005$ [Ω]，$x_1=2$ [Ω]，$x_2=0.005$ [Ω]，励磁コンダクタンス g_0 が 0.00018 [S]，励磁サセプタンス b_0 が 0.00091 [S] である。図 9(a) にならって，この変圧器の等価回路をかいてみよ。

問 7. 図 9 において，一次電圧 $\dot{V}_1$ [V] と一次誘導起電力 $\dot{E}_1$ [V]，二次誘導起電力 $\dot{E}_2$ [V] と二次電圧 $\dot{V}_2$ [V] がそれぞれ一致しないのはなぜか。

問 8. 一次誘導起電力 E_1 が 2000 [V]，二次誘導起電力 E_2 が 100 [V] の変圧器で，一次巻線および二次巻線の抵抗と漏れリアクタンスが $r_1=0.2$ [Ω]，$r_2=0.0005$ [Ω]，$x_1=2$ [Ω]，$x_2=0.005$ [Ω] であるという。巻数比 a および一次・二次インピーダンス $\dot{Z}_1$ [Ω]，$\dot{Z}_2$ [Ω] を求めよ。

（2） 理想変圧器を取り去った等価回路

図 9(a) の等価回路では，理想変圧器という磁気回路を含んでいるが，これを取り去った図 10 の回路を考える。ここで，図 9(a) の端子 a, b から右の方のインピーダンスを $\dot{Z}_{ab}$ [Ω]，端子 c, d から右の方のインピーダンスを $\dot{Z}_{cd}$ [Ω]，図 10 の a′, b′ から右の方のインピーダンスを $\dot{Z}_{a'b'}$ [Ω] とした場合，次の式がなりたつ。

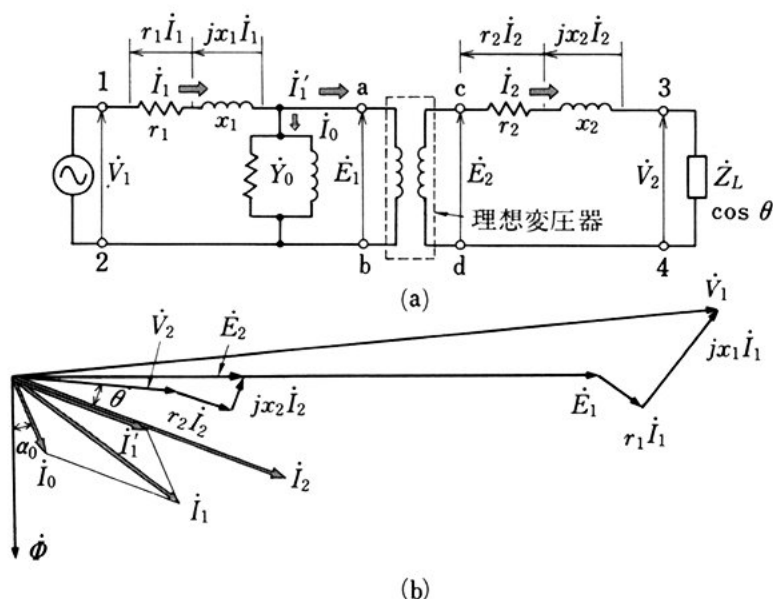



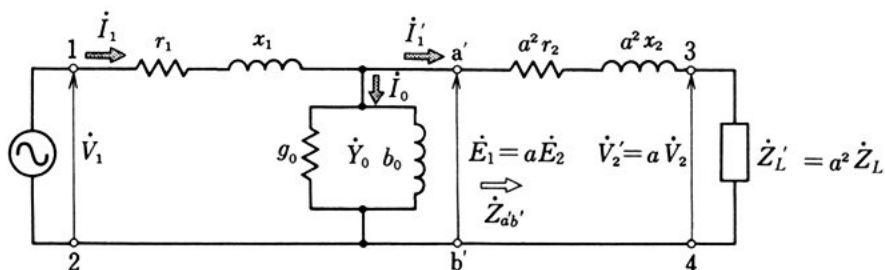
図 9　等価回路とベクトル図

$$\dot{Z}_{ab}=\frac{\dot{E}_1}{\dot{I}_1'}=\frac{a\dot{E}_2}{\dfrac{1}{a}\dot{I}_2}=a^2\frac{\dot{E}_2}{\dot{I}_2}=a^2\dot{Z}_{cd} \tag{8}$$

$$\dot{Z}_{a'b'}=\frac{\dot{E}_1}{\dot{I}_1'} \tag{9}$$

ここで，$\dot{Z}_{ab}=\dot{Z}_{a'b'}$ であれば，図 9 (a) の回路と図 10 の回路は，等価であるといえる。

一次側からみた等価回路　　図 10 の回路は，二次側を一次側に置き換え，一次回路はそのままと考えた回路で，一次側からみた等価回路，または一次側に換算した等価回路という。式（8）からわかる

図 10　一次側からみた等価回路

ように，図 10 の回路は次のように表される。

1) 一次側の電圧・電流・インピーダンスはそのままにする。

2) 二次側のインピーダンス r_2 [Ω], x_2 [Ω], $\dot{Z}_L$ [Ω] などは，a^2r_2 [Ω], a^2x_2 [Ω], $a^2\dot{Z}_L$ [Ω] のように a^2 倍して表している。a^2 を**換算係数**といい，$a^2\dot{Z}_L$ [Ω] などは一次側に換算されたインピーダンスという。

3) 電圧・電流についても，二次電圧 $\dot{V}_2$ [V]，二次電流 $\dot{I}_2$ [A] を一次側に換算した値 $\dot{V}_2'$ [V]，$\dot{I}_1'$ [A] は，次のように表される。

$$\dot{V}_2' = a\dot{V}_2, \qquad \dot{I}_1' = \frac{\dot{I}_2}{a}$$

問 9. 変圧比 a が 2 の変圧器で，二次電圧 V_2 が 100 [V]，二次電流 I_2 が 5 [A]，二次側のインピーダンス Z_L が 20 [Ω] であるという。一次側に換算した値 V_2'，I_1'，Z_L' はそれぞれいくらか。

簡易等価回路　図 10 の回路では，$\dot{Y}_0$ の回路が一次インピーダンスと二次インピーダンスの間に接続されている。図 11 の回路では，一次インピーダンスを負荷側に接続してある。図 11 の場合は回路計算が容易であるが，図 10 では困難である。

実際の変圧器では，一次インピーダンス降下は一次電圧 V_1 [V] に比べて小さく，励磁電流 I_0 [A] も一次電流 I_1 [A] に比べて小さいので，図 10 と図 11 はほとんど等価とみることができる。図 11 の

図 11　簡易等価回路（一次側からみた等価回路）

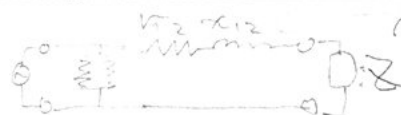
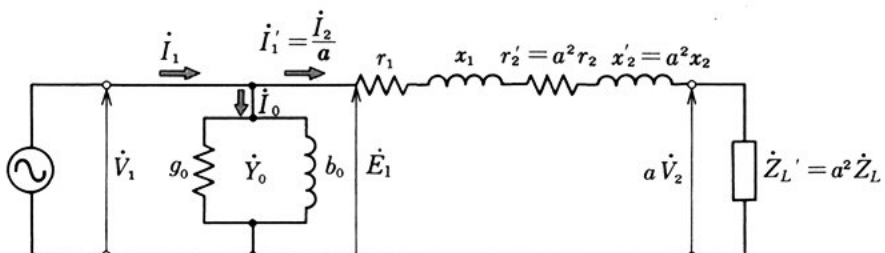
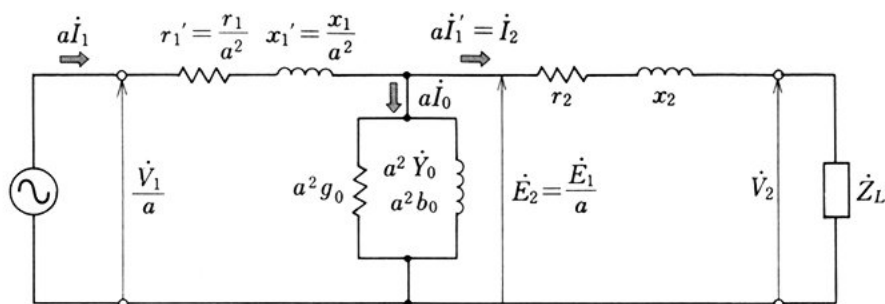



図 12　二次側からみた等価回路

回路を**簡易等価回路**といい，図10の代わりによく用いられる。

二次側からみた等価回路　二次側を一次側に置き換えて等価回路を作ることができた。同様に，一次側をすべて二次側に置き換えて等価回路を作ることもできるはずである。

図12はその等価回路で，この場合，次のように表されている。

1)　二次側の電圧・電流・インピーダンスは，そのままとする。

2)　一次側の電圧は $\frac{1}{a}$ 倍，電流は a 倍する。

3)　一次側のインピーダンスは $\frac{1}{a^2}$ 倍，アドミタンスは a^2 倍する。

問 10.　二次側からみた簡易等価回路を図示せよ。

問 11.　一次側に換算した値が，$r_1=0.2$ [Ω]，$x_1=2$ [Ω]，$r_2'=2$ [Ω]，$x_2'=0.2$ [Ω]，$g_0=0.00018$ [S]，$b_0=0.00091$ [S] であるという。二次側に換算すれば，これらはどんな値になるか。ただし，変圧比 a は20とする。

問 12.　巻数比が100の変圧器において，一次側の電流10 [A] を二次側に換算するといくらになるか。

問 13.　巻数比が10の変圧器において，二次側に100 [Ω] の抵抗がある。これを一次側に換算するといくらになるか。

問　　題

1. 一次電圧が6600 [V] で，無負荷電流 I_0 が0.2 [A]，鉄損 P_i が100 [W] であるという。励磁コンダクタンス，励磁サセプタンス，励磁アドミタンスを求めよ。

2. ある変圧器があって，その一次巻線・二次巻線の巻数が $N_1=200$, $N_2=6000$，一次巻線抵抗 r_1 が0.2 [Ω]，一次漏れリアクタンス x_1 が0.3 [Ω]，二次巻線抵抗 r_2 が20 [Ω]，二次漏れリアクタンス x_2 が30 [Ω] である。一次電圧100 [V] が加わっているとき，次の問いに答えよ。ただし，励磁電流は無視する。

(1) 負荷に20 [Ω] の抵抗をつないだときの一次電流・二次電流を求めよ。

(2) 負荷を短絡したときの一次電流・二次電流を求めよ。

3. 一次電圧6600 [V]，二次電圧220 [V] の変圧器がある。二次側に換算した巻線の合成抵抗 $r_1'+r_2$ が0.12 [Ω]，合成漏れリアクタンス $x_1'+x_2$ が0.1 [Ω] である。これに10 [Ω] の抵抗負荷が接続されている。励磁電流を無視すれば，一次電流はいくらか。

変圧器の特性

この節の目標　変圧器の巻線には，電気抵抗もあれば漏れリアクタンスもある。したがって，負荷電流が流れると電圧降下が生じる。そこで，電圧変動が問題になる。また，変圧器で電力を受け，これを送り出すことを考えると，変圧器の内部で，むだな電力が消費されていないかどうかが問題になる。そこで，変圧器の損失・効率・温度上昇について知る必要がある。

ここでは，これらの変圧器の特性について調べる。

1.　変圧器の電圧変動率

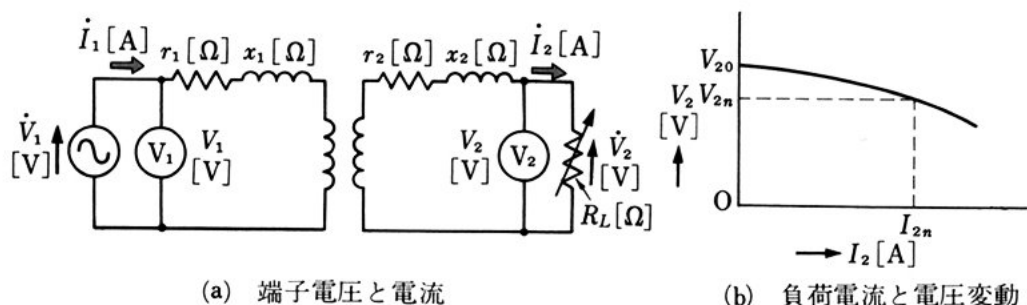
(1)　電　圧　変　動　率

図1(a)に示すように，変圧器の二次側に負荷をつなぎ，一次側に電圧を加えて，負荷抵抗 R_L [Ω] をしだいに小さくすると，図(b)に示すように，電流 I_2 [A] が増加するとともに，端子電圧 V_2 [V] は減少する。これは，一次巻線・二次巻線の抵抗と，漏れリアクタンスによる電圧降下のためである。

変圧器の定格　変圧器の銘板には，定格として電圧・電流・周

図1　変圧器の端子電圧と電流

(a)　端子電圧と電流

(b)　負荷電流と電圧変動

波数・力率・容量の値が示されている。

定格容量は，銘板に記載された皮相電力で，二次定格電圧・定格周波数および定格力率において，指定された温度上昇の限度を超えない状態で，二次側で得られる値であり，kVA の単位で表す。

電圧変動率　図 1(b) に示すように，二次端子電圧は負荷によって変化するが，その変化の程度を示すために，電圧変動率が用いられる。

定格の電流・力率・周波数において，二次巻線の端子電圧を定格値 V_{2n} に保つように，一次端子電圧を調整する。その後，変圧器を無負荷にしたときの二次端子電圧を V_{20} [V] として，その変動 $(V_{20}-V_{2n})$ [V] を調べる。この場合，**電圧変動率** ε [%] は次の式で表される。

$$\varepsilon=\frac{V_{20}-V_{2n}}{V_{2n}}\times 100 \qquad (1)$$

問 1．変圧器の二次定格電圧 V_{2n} が 100 [V]，二次側の無負荷電圧 V_{20} が 110 [V] であるという。電圧変動率 ε を求めよ。

問 2．変圧器の二次定格電圧 V_{2n} が 210 [V]，電圧変動率 ε が 5 [%] であるという。二次側の無負荷電圧を求めよ。

等価回路による電圧変動率の算出　図 2(a) は，二次側に換算した変圧器の簡易等価回路である。ここで，r_{21} [Ω]，x_{21} [Ω] は，二次側に換算した抵抗と漏れリアクタンスであり，次の式で表される。

$$\left.\begin{aligned} r_{21}&=\frac{r_1}{a^2}+r_2 \\ x_{21}&=\frac{x_1}{a^2}+x_2 \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

また，$\dfrac{\dot{V}_1}{a}$ [V] は，無負荷のときの二次端子電圧 $\dot{V}_{20}$ [V] と考えることができ，$\dot{V}_2$ [V] は，二次定格電流 $\dot{I}_{2n}$ [A] が流れているときの

(a)　簡易等価回路　　　　(b)　ベクトル図

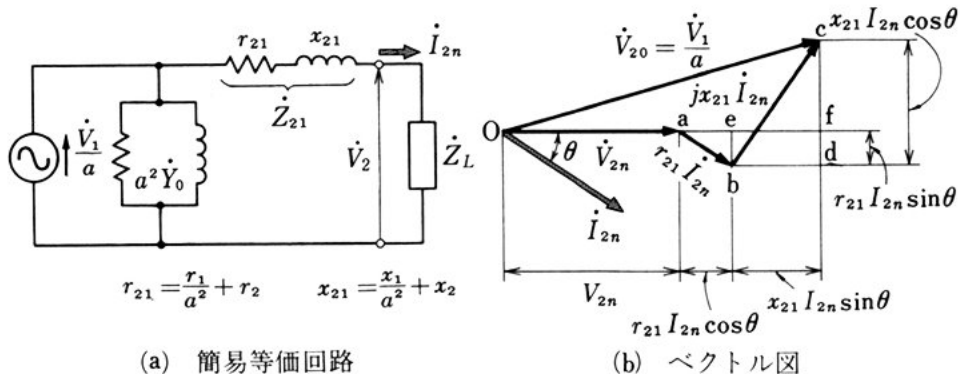



図 2　一次側を二次側に換算した簡易等価回路とベクトル図

二次端子電圧 $\dot{V}_{2n}$ [V] と考えることができる。

この簡易等価回路の電圧・電流のベクトル図を図(b)に示す。V_{20} [V] は，このベクトル図から，次の式で表される。

$$V_{20}=\sqrt{(V_{2n}+r_{21}I_{2n}\cos\theta+x_{21}I_{2n}\sin\theta)^2+(x_{21}I_{2n}\cos\theta-r_{21}I_{2n}\sin\theta)^2}$$

根号の中の第2項は第1項に比べて非常に小さいので，これを無視すると，次の式が得られる。

$$V_{20}=V_{2n}+r_{21}I_{2n}\cos\theta+x_{21}I_{2n}\sin\theta \qquad (3)$$

これから，電圧変動率 ε [%] は次の式で表される。

$$\varepsilon=\frac{V_{20}-V_{2n}}{V_{2n}}\times100=\frac{r_{21}I_{2n}\cos\theta}{V_{2n}}\times100+\frac{x_{21}I_{2n}\sin\theta}{V_{2n}}\times100 \qquad (4)$$

ここで，次に示す p [%]，q [%] を考える。

$$\left.\begin{aligned} p&=\frac{r_{21}I_{2n}}{V_{2n}}\times100\\ q&=\frac{x_{21}I_{2n}}{V_{2n}}\times100 \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

この式からわかるように，p [%]，q [%] は，定格電流が流れるときの巻線抵抗および漏れリアクタンスによる電圧降下の，定格電圧

に対する割合を百分率で示したものである。それぞれを変圧器の**百分率抵抗降下，百分率リアクタンス降下**という。

式（4），（5）から，電圧変動率 ε [%] は次の式で表される。

$$\varepsilon = p\cos\theta + q\sin\theta \qquad (6)$$

式（6）において，力率 $\cos\theta$ が 1 であれば，ε は p で与えられる。

$$\varepsilon = p \qquad (7)$$

例題 1.　図 2 において，$r_1=0.2$ [Ω]，$x_1=2$ [Ω]，$r_2=0.0005$ [Ω]，$x_2=0.005$ [Ω]，$a=20$，$V_{2n}=100$ [V]，$I_{2n}=1000$ [A] であるという。力率 60 [%] における百分率抵抗降下 p [%]，百分率リアクタンス降下 q [%]，電圧変動率 ε [%] を求めよ。

解答

$$r_{21}=\frac{r_1}{a^2}+r_2=\frac{0.2}{20^2}+0.0005=0.001\ [\Omega]$$

$$x_{21}=\frac{x_1}{a^2}+x_2=\frac{2}{20^2}+0.005=0.01\ [\Omega]$$

$$p=\frac{r_{21}I_{2n}}{V_{2n}}\times 100=\frac{0.001\times 1000}{100}\times 100=1\ [\%]$$

$$q=\frac{x_{21}I_{2n}}{V_{2n}}\times 100=\frac{0.01\times 1000}{100}\times 100=10\ [\%]$$

$$\varepsilon=p\cos\theta+q\sin\theta=1\times 0.6+10\times 0.8=8.6\ [\%]$$

問 3.　百分率抵抗降下 p が 1.64 [%]，百分率リアクタンス降下 q が 4.62 [%] であるという。力率 100 [%] および 80 [%] の場合の電圧変動率 ε [%] を求めよ。

電圧変動率の値　図 3 は，単相油入変圧器の容量 [MVA] と電圧変動率 ε [%] の関係を調べたものである。

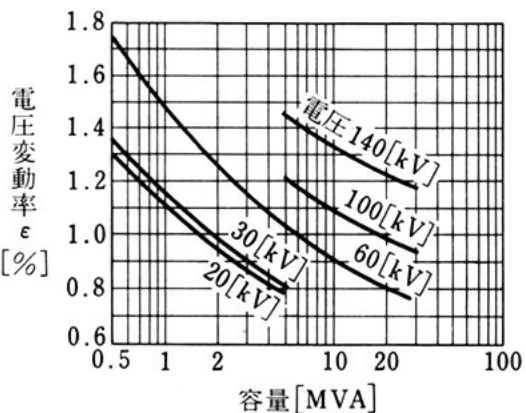



図 3　電圧変動率の値

一般に，容量の大きな変圧器ほど電圧変動率は小さい。

問 4.　変圧器の電圧変動率が大きいと，都合がわるいのはどんな場合か。また，これを改善するには，どうしたらよいか。

（2）　インピーダンス電圧

図4(a)に示すように，低圧側* を短絡して電圧を加え，そのときの電流 $\dot{I}_{1s}$ [A] が定格一次電流 $\dot{I}_{1n}$ [A] に等しいとき，その供給電圧 $\dot{V}_{1z}$ [V] を**インピーダンス電圧**という。

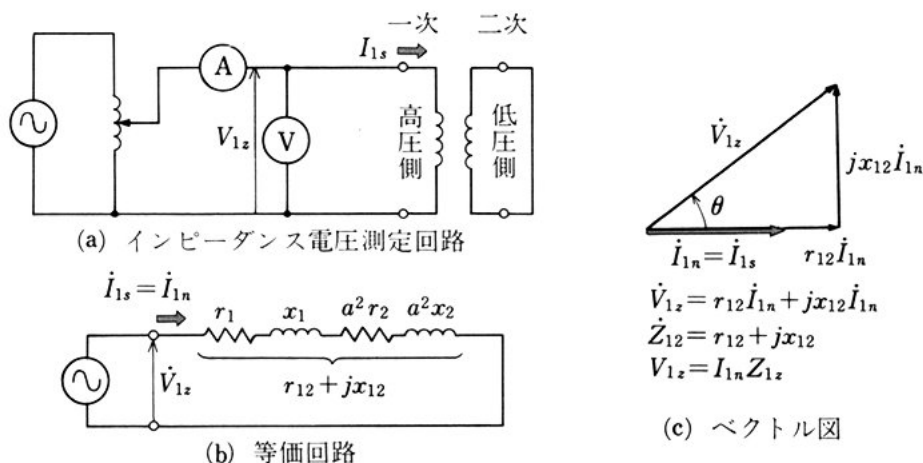
図(a)を一次側からみた回路として，等価回路で表せば，図(b)となる。$\dot{V}_{1z}$ は，図(c)のベクトル図に示すように，$r_{12}\dot{I}_{1n}+jx_{12}\dot{I}_{1n}$ であって，定格電流が流れているときの，巻線のインピーダンスによる電圧降下を表している。

インピーダンス電圧 V_{1z} [V] と定格電圧 V_{1n} [V] の比 z [%] は，**百分率インピーダンス降下**とよばれ，次の式で表される。

図 4　インピーダンスの測定

(a) インピーダンス電圧測定回路

(b) 等価回路

(c) ベクトル図

(d)

容　量 [kVA]	一次電圧 [kV]	p [%]	q [%]	z [%]
100	11	1.64	4.62	4.90
3000	66	0.80	6.83	6.87
15000	169	0.58	9.30	9.30

* 図4では二次側となっているが，電圧を上げる変圧器では，一次側となる。

$$z=\frac{V_{1z}}{V_{1n}}\times100=\frac{I_{1n}Z_{12}}{V_{1n}}\times100=\sqrt{\left(\frac{r_{12}I_{1n}}{V_{1n}}\right)^2+\left(\frac{x_{12}I_{1n}}{V_{1n}}\right)^2}\times100$$
$$=\sqrt{p^2+q^2} \qquad (8)$$

一般に，電圧変動率 ε [%] を小さくするには，百分率インピーダンス降下 z [%] を小さくする必要がある。しかし，大容量の変圧器では，二次側の短絡事故による過大な短絡電流を防ぐため，百分率インピーダンス降下 z [%] をある程度大きくしている。表(d)はその例である。

(3) 短 絡 電 流

電力用の変圧器の銘板にはすべて百分率インピーダンス降下が示されている。すべての電力機器，設備をこの方法で表すことによって，系統に短絡などの事故が発生したとき，各系統の電流を容易に計算することができる。

一次定格電圧 V_{1n} の変圧器の百分率インピーダンス降下が Z_{12} [%] であるとき，短絡電流(一次側) I_s [A] は，$I_s=\frac{V_{1n}}{Z_{12}}$ と，式 (8) の第 2 項から導かれた $Z_{12}=\frac{zV_{1n}}{100I_{1n}}$ より，次の式で表される。

$$I_s=\frac{100I_{1n}}{z} \quad [\mathrm{A}] \qquad (9)$$

例題 2. 一次電圧が 6000 [V]，二次電圧が 200 [V]，容量が 200 [kVA] の単相変圧器がある。百分率インピーダンス降下 z は 5 [%] である。二次側が短絡したときの一次短絡電流 I_s [A] を求めよ。

解答 一次定格電流 $I_{1n}=\frac{200000}{6000}=33.3$ [A]

式 (9) から，

一次短絡電流 $I_s=\frac{100\times33.3}{5}=666$ [A]

問 5.　図2において，二次定格電流 I_{2n} が 20 [A]，二次側に換算した抵抗 r_{21} が 0.1 [Ω]，二次側に換算したリアクタンス x_{21} が 0.2 [Ω]，二次定格電圧 V_{2n} が 200 [V] であるという。p [%]，q [%]，z [%] を求めよ。

問 6.　百分率抵抗降下 p が 0.58 [%]，百分率リアクタンス降下 q が 9.30 [%] の変圧器がある。百分率インピーダンス降下 z [%] と，力率 80 [%] の場合の電圧変動率 ε [%] とを求めよ。

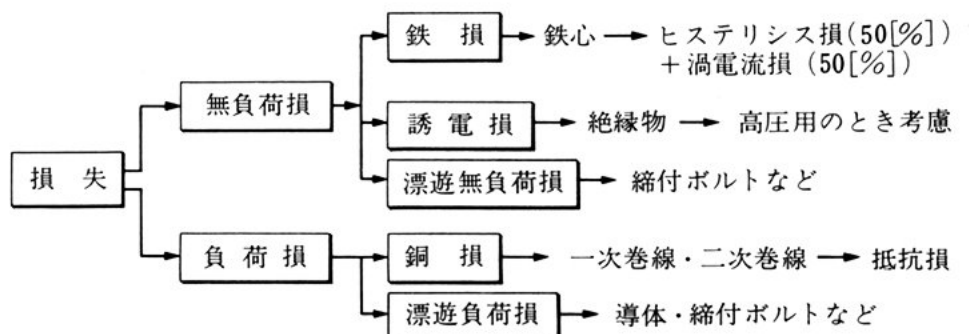
問 7.　一次定格電圧 V_{1n} が 6600 [V]，容量が 50 [kVA] の変圧器がある。百分率インピーダンス降下 z は 4 [%] である。一次短絡電流 I_s [A] を求めよ。

2.　変圧器の損失と効率

（1）変圧器の損失

変圧器は，電圧を昇降させる装置で，一般に，大きな電力を受けて電圧を変え，その電力を送り出すのに広く用いられている。エネルギー伝送装置としての変圧器の効率は，99.99 [%] というようにきわめて良好であるが，それでも変圧器の内部に損失がある。

変圧器の内部の損失は，図5に示すように，いろいろなものがあ

図 5　変圧器の損失

る。これらの損失のうちで大きなものは，銅損と鉄損である。**銅損**は，一次巻線・二次巻線に流れる電流によるジュール熱（rI^2）であり，抵抗損ともよばれる。**鉄損**は，鉄心中の損失であり，ヒステリシス損 P_h [W/kg] と，渦電流損 P_e [W/kg] とからなる。これらは次の式で表される。

$$P_h = k_h f B_m{}^2 \tag{10}$$

$$P_e = k_e (t k_f f B_m)^2 \tag{11}$$

ここで，k_h，k_e は材料によって決まる定数，t [mm] は鋼板の厚さ，B_m [T] は磁束密度の最大値，f [Hz] は周波数，k_f は波形率である。正弦波では $k_f = 1.11$ である。

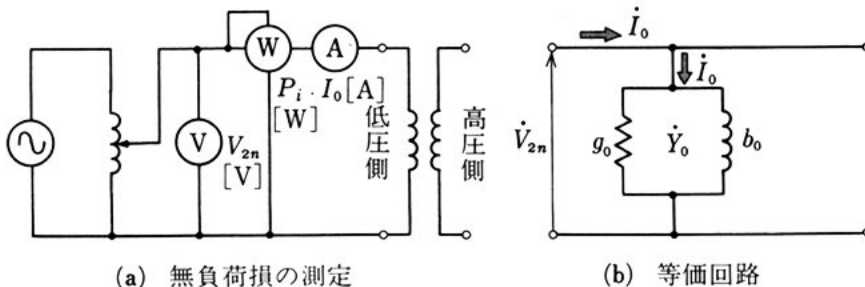
問 8. 変圧器の効率は直流機の効率と比べて，一般にどちらがよいか。

問 9. 式 (10)，(11) において最大磁束密度が 80 [%] になれば，ヒステリシス損 P_h [W/kg]，渦電流損 P [W/kg] はどうなるか。

（2） 無負荷損とその測定

変圧器の巻線に定格電圧が加わっているが，負荷が接続されていないとき，変圧器の損失だけが電力として供給されている。この損失は**無負荷損**とよばれる。無負荷損の大部分は鉄損である。そのほか，わずかではあるが，一次巻線抵抗による銅損，絶縁物中の誘電損，締付ボルトなどの金属材料の中に誘導される渦電流による**漂遊無負荷損**が含まれる。

図 6 無負荷試験

(a) 無負荷損の測定　(b) 等価回路

無負荷損を測定するには，図6(a)に示すように，高圧側の回路を切り離して低圧側の回路に定格電圧 V_{2n} [V] を加え，電力計Wの指示 P_i [W] を調べる。このように，変圧器に負荷をかけないで行う試験を **無負荷試験** という。無負荷試験を行うと次のことがわかる。図6(a)において，電圧計Vの指示 V_{2n} [V]，電流計Aの指示 I_0 [A]，電力計Wの指示 P_i [W] がわかれば，次の式から，図(b)に示される等価回路の g_0 [S]，b_0 [S]，および力率 $\cos\theta_0$ を求めることができる。

$$\left.\begin{aligned} & g_0=\frac{P_i}{V_{2n}^2}, \qquad b_0=\sqrt{\left(\frac{I_0}{V_{2n}}\right)^2-\left(\frac{P_i}{V_{2n}^2}\right)^2} \\ & \cos\theta_0=\frac{P_i}{V_{2n}I_0} \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

例題 **3**．ある変圧器で，二次定格電圧 V_{2n} が 100 [V]，無負荷損 P_i が 180 [W]，励磁電流 I_0 が 10 [A] であるという。回路の g_0 [S]，b_0 [S] および力率 $\cos\theta_0$ を求めよ。

解答　$g_0=\dfrac{P_i}{V_{2n}^2}=\dfrac{180}{100^2}=0.018$ [S]

$b_0=\sqrt{\left(\dfrac{10}{100}\right)^2-\left(\dfrac{180}{100^2}\right)^2}=0.098$ [S]　　$\cos\theta_0=\dfrac{180}{100\times 10}=0.18$

問 10．ある変圧器で，二次定格電圧 V_{2n} が 100 [V]，無負荷損 P_i が 40 [W]，励磁電流 I_0 が 1.5 [A] であるという。回路の g_0 [S]，b_0 [S]，および力率 $\cos\theta_0$ を求めよ。

(3)　負荷損とその測定

定格電圧が加わり，負荷電流が流れているときには，無負荷損とともに，負荷電流が一次巻線・二次巻線に流れることによる銅損が生じる。また，大きな負荷電流のために，漏れ磁束も多くなり，外箱や締付ボルトなどに生じる渦電流が増加し，電力をむだに消費す

(a) 短絡試験　(b) インピーダンス等価回路

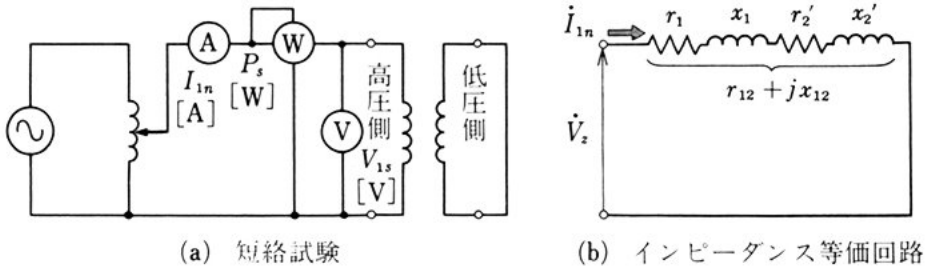



図 7 負荷損の測定

る。この種の損失は**漂遊負荷損**とよばれ，銅損の 10〜25［%］程度である。

一般に，負荷電流が流れることによって生じる損失を**負荷損**という。負荷損は，銅損と漂遊負荷損からなる。

負荷損を測定するには，図 7(a) に示すように，低圧側の回路を短絡して，インピーダンス電圧 V_{1s}［V］を加え，一次定格電流 I_{1n}［A］の電流を流し，電力計 W の読み P_s［W］によって求める。このときの P_s［W］は**インピーダンスワット**とよばれる。インピーダンスワットは，巻線の銅損に漂遊負荷損を含めたものである。このように，低圧側を短絡して行う試験を**短絡試験**という。

短絡試験を行うと，インピーダンスワット P_s［W］がわかるとともに，図(b)の等価回路で示される抵抗 r_{12}［Ω］，リアクタンス x_{12}［Ω］を求めることができる。そのうち，抵抗 r_{12}［Ω］は次の式で表される。

$$r_{12}=\frac{P_s}{I_{1n}^2} \qquad (13)$$

この式で示す r_{12}［Ω］は，一次・二次巻線の一次側換算抵抗だけではなく，漂遊負荷損を表す等価抵抗を含んだものである。

なお一般に，無負荷損は，ほとんどが鉄損であり，温度による変化は少ないが，負荷損は，温度によってある程度変化する。電気機

器の試験ではふつう 75 [°C] を基準温度としているから，短絡試験で得た P_s [W] や r_{12} [Ω] は温度補正を行う必要がある。すなわち，測定したときの温度における値をもとにして，75 [°C] における値を求める。

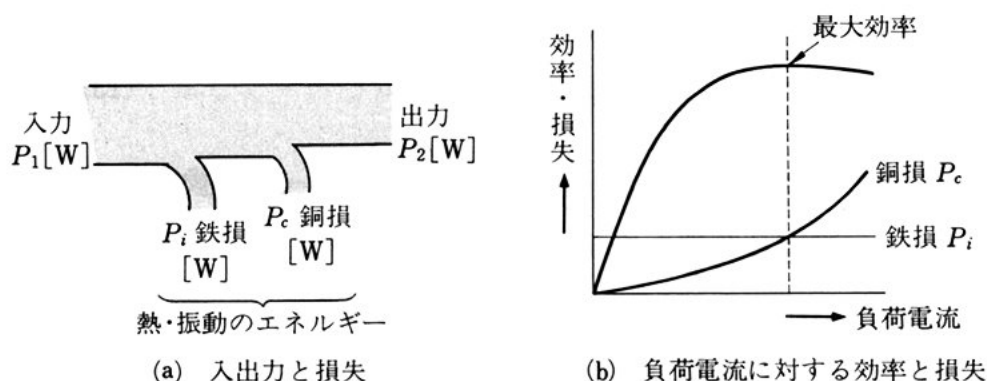
(4) 変圧器の効率

変圧器の出力と入力との比を**変圧器の効率**という。変圧器では，鉄損・銅損などの損失があるから，入力のすべてが出力とはならない。損失が大きくなると変圧器の効率は小さくなる。入力から出力に至るエネルギーの出入りを図 8 (a) に示す。

実測効率と規約効率　変圧器の効率は，実際に定格電圧を加え，定格電流を流して測定する。この方法で求めた効率を**実測効率**という。しかし，この方法は，変圧器の容量が大きくなると，それに応じた電源設備を必要とするため，実現しにくいことが多い。そこで，無負荷試験や短絡試験を行い，内部の温度が 75 [°C] になった場合の抵抗値や負荷損に換算して効率を算出する。この方法で求めた効率を**規約効率**という。変圧器の場合，効率 η [%] は規約効率によって計算される。

図 8 負荷電流と変圧器の効率

(a) 入出力と損失

(b) 負荷電流に対する効率と損失

$$実測効率=\frac{出力}{入力}\times 100 \tag{14}$$

$$\left.\begin{aligned}規約効率&=\frac{出力}{出力+無負荷損+負荷損}\times 100\\&=\frac{P_2}{P_2+P_i+P_c}\times 100\end{aligned}\right\} \tag{15}$$

$$\eta=\frac{V_{2n}I_{2n}\cos\theta}{V_{2n}I_{2n}\cos\theta+P_i+P_c}\times 100 \tag{16}$$

ここに，P_2 [kW] は二次定格出力，P_i [W] は鉄損，P_c [W] は銅損，V_{2n} [V] は二次定格電圧，I_{2n} [A] は二次定格電流である。

式 (16) は，$P_i=P_c=I_{2n}^2r_{21}$ のとき，分母が最小となる。すなわち鉄損＝銅損のとき，変圧器の効率 η [%] は最大効率を示す。

変圧器の負荷（全負荷）の大きさを $\frac{1}{n}$ 倍（$\frac{1}{n}$ 負荷）にしたとき，電流は $\frac{1}{n}I_{2n}$ となり，銅損は $\left(\frac{1}{n}I_{2n}\right)^2r_{21}=\frac{1}{n^2}P_c$ となる。鉄損 P_i は負荷の大きさに関係なく一定である。したがって，負荷が $\frac{1}{n}$ になったときの効率は，次の式で表される。

$$\eta_{\frac{1}{n}}=\frac{\frac{1}{n}V_{2n}I_{2n}\cos\theta}{\frac{1}{n}V_{2n}I_{2n}\cos\theta+P_i+\frac{1}{n^2}P_c}\times 100\ [\%] \tag{17}$$

負荷の大きさと，変圧器の効率との関係を図 8 (b) に示す。変圧器は，一般に負荷電流が定格電流の 75 [%]（$\frac{3}{4}$ 負荷）程度のとき最大効率を示すように設計されている。

例題 **4**．変圧器の出力が 15000 [kW]，無負荷損が 57 [kW]，負荷損が 101.3 [kW] である。負荷力率が 80 [%] のとき，全負荷効率 η [%]，および $\frac{3}{4}$ 負荷効率 $\eta_{\frac{3}{4}}$ [%] を求めよ。

解答 $\eta=\dfrac{15000\times0.8}{15000\times0.8+57+101.3}\times100=98.7$ [%]

$$\eta_{\frac{3}{4}}=\frac{0.75\times15000\times0.8}{0.75\times15000\times0.8+57+0.75^2\times101.3}\times100$$

$$=98.8\ [\%]$$

このときの鉄損と銅損はほぼ等しくなり，効率は最大となる。

問 11． 例題4の変圧器で負荷力率を 100 [%] としたときの全負荷効率 η [%]，および $\dfrac{1}{4}$ 負荷効率 $\eta_{\frac{1}{4}}$ [%] を求めよ。

問 12． 変圧器の出力が 15000 [kW]，無負荷損 57000 [W]，銅損 57000 [W]，漂遊負荷損 12200 [W] である。この変圧器の全負荷効率 η [%] を求めよ。

全日効率　変圧器の二次側の負荷は時間とともに変動するが，一次側では，負荷の大小に関係なく，つねに鉄損が生じている。このことから，変圧器の効率のよい利用のされ方を表すために全日効率が使われる。**全日効率** η_d [%] は，1日を通しての出力電力量と入力電力量との比であり，次の式で表される。

$$\eta_d=\frac{1\text{日の出力電力量}\ [\text{kW}\cdot\text{h}]}{1\text{日の入力電力量}\ [\text{kW}\cdot\text{h}]}\times100 \qquad (18)$$

1日のうち，全負荷出力 P [kW] で t 時間変圧器が運転されたときの全日効率 η_d [%] は，次の式で表される。

$$\eta_d=\frac{Pt}{Pt+24P_i+P_ct}\times100 \qquad (19)$$

式 (19) で，$24P_i$ と P_ct の関係から，両者が等しい場合，全日効率は最大となる。したがって，1日中無負荷運転に近い変圧器は，鉄損の小さな巻鉄心形が適している。また，1日中全負荷運転に近い変圧器は，銅損を少なくした設計のものが用いられる。

例題 5． 変圧器の出力が 15000 [kW]，無負荷損 57 [kW]，負荷損 101.3 [kW] である。この変圧器が1日のうち8時間は全負

荷，8時間は $\frac{1}{2}$ 負荷，8時間は無負荷で運転される。全日効率 η_d [%] を求めよ。ただし，力率はいずれの場合も 100 [%] とする。

解答 1日の出力電力量＝15000×8＋7500×8＝180000 [kW·h]

5 1日の全無負荷損電力量＝57×24＝1368 [kW·h]

1日の全銅損電力量＝101.3×8＋$\left(\frac{1}{2}\right)^2$×101.3×8

＝1013 [kW·h]

$$\eta_d = \frac{180000}{180000 + 1368 + 1013} \times 100 = 98.7 \text{ [\%]}$$

問 13. 例題5で，8時間全負荷運転し，後は無負荷運転をする場合の

10 全日効率 η_d [%] を求めよ。

3. 変圧器の温度上昇と冷却

(1) 温度上昇と温度測定

変圧器に負荷を接続し，回路を閉じると電流が流れ，変圧器の内部に鉄損・銅損を生じ，図9(a)に示すように，その温度が上昇し，

15 ついには一定温度に達する。この温度を**最終温度**という。最終温度が，使用している絶縁物の許容温度を超えないようにしなければならない。

温度の測定には，図(b)，(c)に示すように，温度計を用いる方法と，抵抗の温度係数を利用して測定する方法とがある。大形の変圧

20 器などでは，温度測定のために，**測温抵抗**（銅線など）が巻いてあって，その抵抗をブリッジで測定し，温度を知ることができるようになっているものが多い。

常温 t [°C] のときの抵抗値を R_t [Ω] とし，上昇後の温度 T [°C] のときの抵抗値を R_T [Ω] とすると，抵抗と温度の関係は，次

(c)

変圧器の部分		温度測定方法	温度上昇限度[°C]
巻　線		抵 抗 法	55
油	本体タンク内の油が直接外気と接触する場合	温度計法	50
	本体タンク内の油が直接外気と接触しない場合		55

(JIS C 4304-1977による)

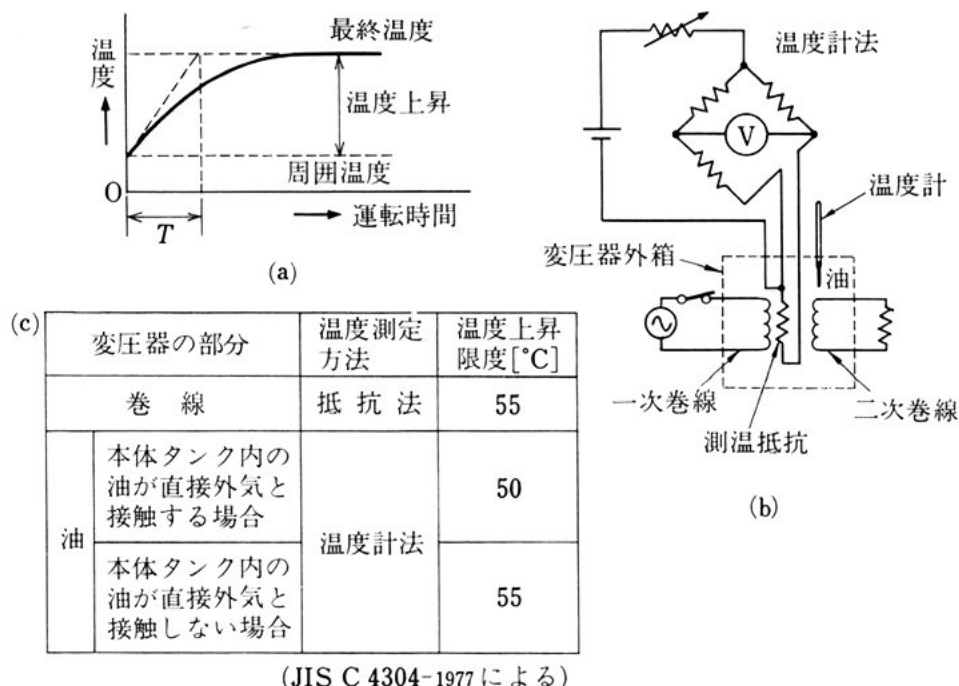



図 9　温度上昇と温度測定

の式で表される。

$$\frac{R_T}{R_t}=\frac{234.5+T}{234.5+t} \qquad (20)$$

規約効率を計算する場合，上昇後の温度 T を 75 [°C] として，この温度のときの抵抗値 r_{21} を計算して損失を求めることができる。

絶縁材料　変圧器の温度上昇によって，直接破壊するおそれがあるのは，絶縁材料である。

図 10 は，小形，中形油入変圧器の規格および，これに使用される材料の例を示したものである。

ブッシング　変圧器巻線の端子を，鉄製外箱の外に引き出すための口出線と外箱との絶縁には，図 11 のブッシングが用いられる。

変圧器油　変圧器油は，変圧器本体を浸し，巻線の絶縁をよくするとともに，冷却することによって変圧器本体の温度上昇を防ぐ

配電用6［kV］油入変圧器

項目		内容
定格容量［kVA］	⇨	5, 10, 20, 30, 50, 75, 100(1, 2 種)* 150, 200, 300, 500 (2 種のみ)
温度上昇限度	⇨	とくに指定のないとき，図 9(c)による。
一次側口出線	⇨	6600［V］カンブリック絶縁電線か，これと同等以上のもの
二次側口出線	⇨	600［V］ポリエチレン絶縁電線または6600［V］カンブリック絶縁電線か，これと同等以上のもの
ブッシング	⇨	丈夫な硬質磁器製か，これと同等以上のもの 一次ブッシングの沿面距離は外部で75［mm］以上

図 10　変圧器の例（JIS C 4304-1977 による）

(a)単一形ブッシング　(b)油入形ブッシング

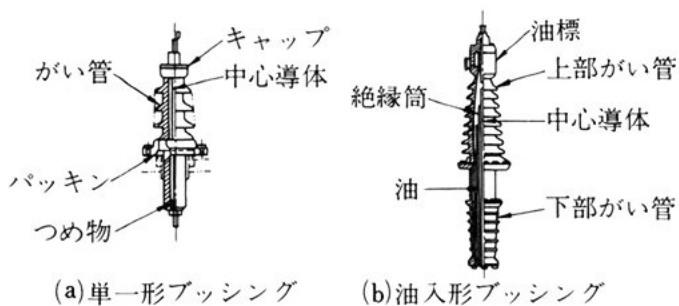



図 11　ブッシングの例

ためのもので，次の条件をもつものが用いられる。

1)　絶縁耐力が大きく，引火点が高く，凝固点が低い。

2)　化学的に安定であって，高温においても反応しない。

3)　冷却作用が大きい。

油の劣化防止　油入変圧器では，負荷の変動に伴って，油の温度は上下し，油は膨張・収縮を繰り返す。それで，変圧器内部の空気が大気中に出入りを繰り返す。これを変圧器の**呼吸作用**という。このため，大気中の湿気が油の中に侵入すると，絶縁耐力が低下するだけでなく，油面に接する空気中の酸素によって，油が酸化され，

*　変圧器の特性による種類には，1 種と 2 種がある。1 種は方向性けい素鋼帯などが使用されているものであり，2 種は無方向性けい素鋼帯などが使用されているものである。

(a) ブリーザ　(b) コンサベータ

(c) 隔膜方式　(d) 窒素封入方式

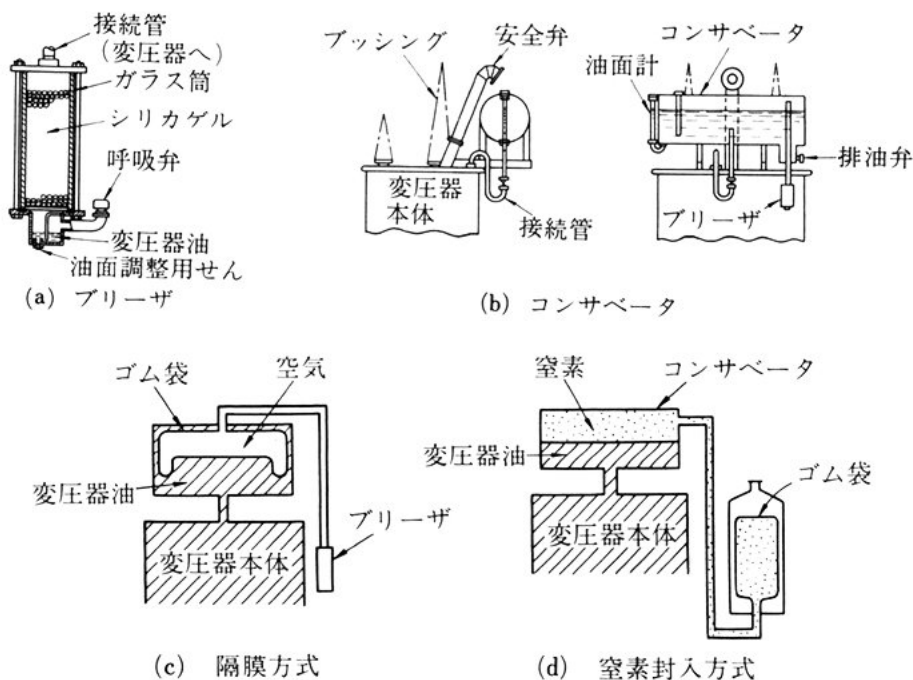



図 12 変圧器油の劣化防止法

有害な赤褐色の不溶解性の沈殿物(**スラッジ**)ができる。

油の劣化防止のために，図12(a), (b)のブリーザやコンサベータを図(c), (d)のように用いる。

図(a)は，**ブリーザ**とよばれるもので，大気中の湿気を除去する働きをする。**コンサベータ**は，図(b)に示すように，油の膨張・収縮による油面の上下が，の内部だけで行われるようにしてある。こうしておけば，油の汚損が少なく，スラッジが生じても，底部の排出口から除去できる。図(c), (d)は，変圧器油を大気と遮断した状態にしたもので，大容量変圧器は，この方式を用いている。

(2) 冷 却 方 式

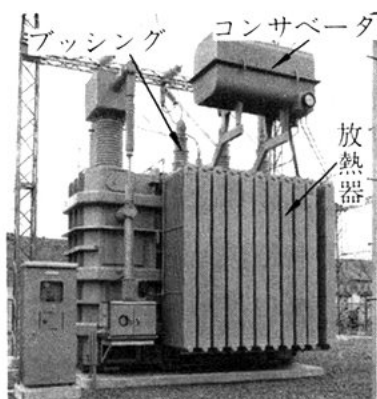
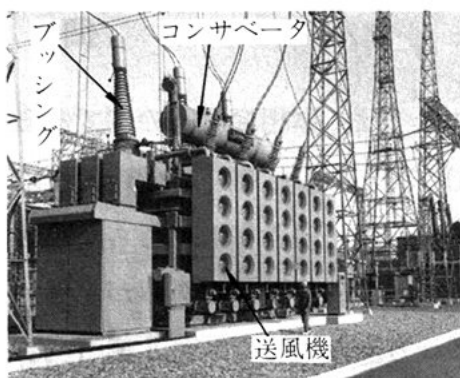
変圧器本体を油で冷却しても，油を収めてある外箱から熱が逃げなければ，油槽の温度が上昇し，冷却効果はない。この冷却方式には，次のようなものがある。

(a) 油入自冷式変圧器

(b) 油入送風式変圧器

図 13 冷却方式

乾式自冷式　変圧器本体を大気の対流によって冷却させる方式で，コイルをエポキシ樹脂で固め，油を使用しない。

油入自冷式　油中に浸した本体の熱を，油の自然対流で外箱に伝え，外箱から自然に放散させる方式である。容量の大きな変圧器では，図 13(a) に示すように，**放熱器** (radiator) をつけている。

油入送風式　図 13(b) のように，油入自冷式の放熱器を，送風機で強制通風する方式である。

油入送油式　外箱から出ただ管または放熱器に，油をポンプによって強制循環させ，その油を外部の水槽で冷却する方式である。

ガス冷却式　変圧器油の代わりに，化学的に安定なフロン・六ふっ化硫黄 (SF_6) などのガスを冷却材とし，液体の気化熱を利用して冷却する方式である。

問 14. 変圧器を冷却しなければならないのはなぜか。ガス冷却式では，気化したガスの絶縁耐力は大きくなくてはならない。なぜか。

問 15. 変圧器の巻線抵抗は 25 [°C] で 0.0023 [Ω] であった。温度上昇試験をし，抵抗を測定したら 0.0027 [Ω] となった。巻線の温度を求めよ。

問　　題

1. 表1は，単相変圧器の例である。次の問いに答えよ。

(1) 50 [Hz] と 60 [Hz] の変圧器を比べると，効率はどちらが大きいか。電圧変動率はどちらが小さいか。無負荷電流はどちらが小さいか。無負荷損はどちらが小さいか。また，各場合の理由を説明せよ。

(2) 方向性けい素鋼帯と無方向性けい素鋼帯を比べ，どちらがどのように異なっているか。また，その理由は何か。

表1 変圧器の例

種　類	定格容量 P [kVA]	定格出力における効率 [%]		定格出力における電圧変動率 [%]		無負荷電流 I_0 [%]*		無負荷損 [W]	
		50 [Hz]	60 [Hz]	50 [Hz]	60 [Hz]	50 [Hz]	60 [Hz]	50 [Hz]	60 [Hz]
1種（方向性けい素鋼帯使用）	10	97.2 以上	97.3 以上	2.3 以下	2.1 以下	3.5 以下	3.0 以下	58 以下	58 以下
2種（無方向性けい素鋼帯使用）	10	96.9 以上	97.2 以上	2.3 以下	2.1 以下	7.0 以下	6.0 以下		
	500	98.3 以上	98.4 以上	1.3 以下	1.3 以下	4.5 以下	4.5 以下		

* 定格電流 I_1 [A] に対する比率で表す。

（JIS C 4304-1977 による）

2. 巻数比 a が 60 の単相変圧器の電圧変動率 ε が 2.6 [%] である。二次側に 105 [V]，力率 100 [%] の全負荷をつないだ場合，一次側端子電圧はいくらになるか。

3. 変圧器の効率は，銅損と鉄損が等しいとき最もよいのはなぜか。

4. 50 [kVA]，6000 [V] の変圧器がある。百分率抵抗降下 p が 1.64 [%]，百分率リアクタンス降下 q が 4.62 [%] である。一次短絡電流 I_s [A] を求めよ。

5. 容量 50 [kVA] の変圧器に力率 100 [%] の負荷を加えたとき，全負荷効率 η は 95.5 [%]，電圧変動率 ε は 3 [%] であった。鉄損を求めよ。

変圧器の結線

この節の目標　負荷設備を増設したとき，既設の変電設備では容量が不足するので，変圧器を増設する。このような場合，いくつかの変圧器を接続する必要がある。ここでは，いろいろな単相変圧器の結線方法について調べる。

1. 並 列 結 線

(1) 極性と端子記号

単相変圧器の一次巻線と二次巻線のおのおのの一端 U, u を，図 1 に示すように接続し，一次巻線に任意の電圧を加える場合を考える。一次巻線・二次巻線の巻く向きが図に示すようであれば，他の端子 V, v 間の電圧 V_3 [V] は，一次電圧 V_1 [V] と二次電圧 V_2 [V] との差に等しい電圧 $V_1 - V_2$ [V] になる。もし，U, u の代わりに U, v を接続し，V, u 間の電圧を V_3' [V] とすれば，$V_3' = V_1 + V_2$ [V] となる。

図 1　極性と端子記号

このようなことがあるので，変圧器の外箱には**端子記号**がつけてある。この記号は，JIS C 4304 に規定されており，高圧側（一次端子）に U, V，低圧側（二次端子）に u, v を用い，高圧端子から変圧器をみて右側に U をつける。また，U と u が外箱の同じ側にある変圧器を**減極性**，U と u が対角線上にある変圧器を**加極性**という。我が国で

(a) 正しい結線　(b) 正しくない結線

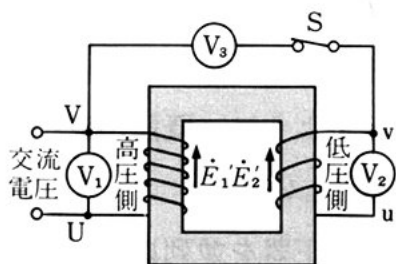
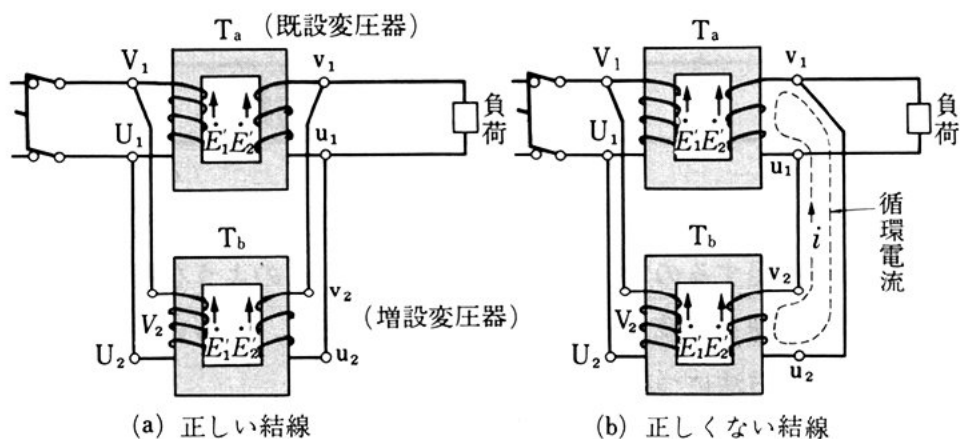



図 2 単相変圧器の並列結線

は，JIS で減極性が標準と規定している。

問 1. 変圧器の極性とは何か。

問 2. 変圧器の極性を調べるには，どのようにすればよいか。

（2） 変圧器のつなぎ方（並行運転）

1台の変圧器から電力を供給している負荷設備において，負荷が増加したとき，変圧器の容量が不足することがある。このような場合，増設負荷に応じられる容量の変圧器を新しく設置し，図2(a)に示すように，既設の変圧器と並列につないで使用する。これを**並行運転**という。

変圧器を並列につなぐ場合，図(a)のように，各変圧器の巻線の巻く向きが同一になるように，つながなくてはならない。もし，図(b)のように，二次側の各変圧器の巻く向きが，反対になるようにつなぐと，二次側を短絡することになり，非常に大きな循環電流 i が流れて，巻線を焼損することになる。

問 3. 変圧器をつなぐとき，どんな注意が必要か。

問 4. 図2(b)において，循環電流が流れる理由を説明せよ。

（3） 並行運転の条件

2台の変圧器を用いて並行運転をする場合，それぞれの変圧器に定格を超えない電流を分担させることが必要であって，そのためには次の条件が必要である。

1) 各変圧器の極性が一致していること
2) 各変圧器の巻数比が等しいこと
3) 各変圧器の巻線抵抗と漏れリアクタンスの比 $\dfrac{r}{x}$ が等しいこと
4) 各変圧器の百分率インピーダンス降下が等しいこと

もし，3)の条件が満たされていないと，各変圧器の電圧が異なっているのと同じ結果になり，各端子の電圧が不平衡になる。また，4)は，各変圧器に定格出力に比例する電流を分担させるために必要

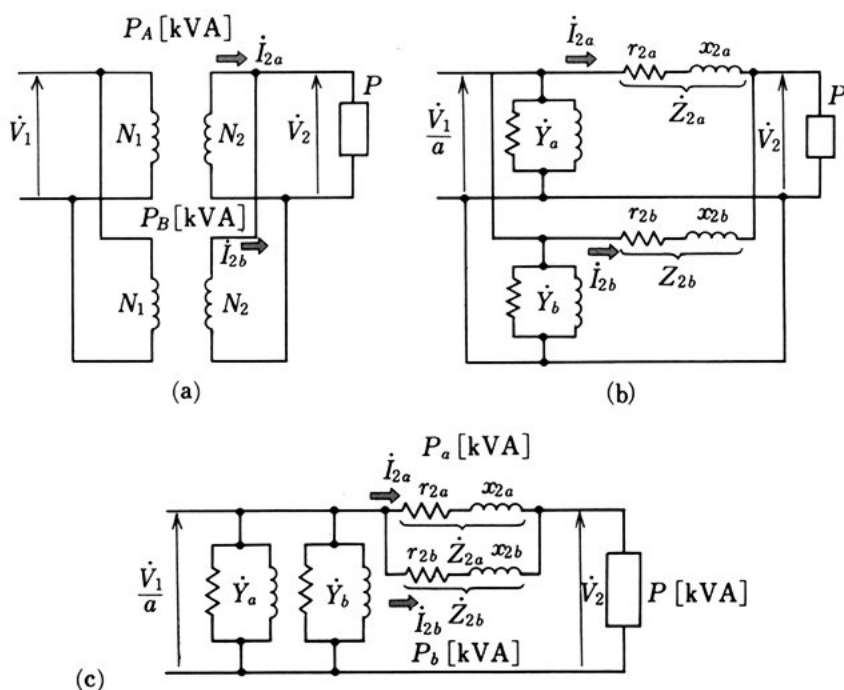
図 3　並行運転の等価回路（二次側換算）

である。

図3(c)の回路で，二次側インピーダンスに流れる電流を I_{2a} [A], I_{2b} [A] とすると，インピーダンス降下は $I_{2a}Z_{2a}=I_{2b}Z_{2b}$ であるから，

$$\frac{I_{2a}}{I_{2b}}=\frac{Z_{2b}}{Z_{2a}}$$

二次定格電流を $\dot{I}_{2A}$ [A], $\dot{I}_{2B}$ [A] とすると，百分率インピーダンス降下 z_a [%], z_b [%] より，インピーダンス Z_{2a} [Ω], Z_{2b} [Ω] を求めると次のようになる。

$$z_a=\frac{I_{2A}Z_{2a}}{V_2}\times 100 \qquad Z_{2a}=\frac{z_a V_2}{100I_{2A}}$$

$$z_b=\frac{I_{2B}Z_{2b}}{V_2}\times 100 \qquad Z_{2b}=\frac{z_b V_2}{100I_{2B}}$$

$$\frac{I_{2a}}{I_{2b}}=\frac{Z_{2b}}{Z_{2a}}=\frac{z_b I_{2A}}{z_a I_{2B}} \qquad \frac{I_{2a}}{I_{2b}}=\frac{Z_{2b}}{Z_{2a}}=\frac{I_{2a}V_2}{I_{2b}V_2}=\frac{z_b(I_{2A}V_2)}{z_a(I_{2B}V_2)}$$

$I_{2a}V_2=P_a$, $I_{2b}V_2=P_b$ は変圧器が供給している電力であって，$I_{2A}V_2=P_A$, $I_{2B}V_2=P_B$ は定格容量とすると，

$$\frac{P_a}{P_b}=\frac{\dfrac{P_A}{z_a}}{\dfrac{P_B}{z_b}} \qquad (1)$$

負荷電力を $P=P_a+P_b$ とすると，各変圧器の電力すなわち分担負荷 P_a, P_b は，次の式で与えられる。

$$P_a=P\frac{\dfrac{P_A}{z_a}}{\dfrac{P_A}{z_a}+\dfrac{P_B}{z_b}},\quad P_b=P\frac{\dfrac{P_B}{z_b}}{\dfrac{P_A}{z_a}+\dfrac{P_B}{z_b}} \qquad (2)$$

例題 1. 定格電圧の等しいA, B 2台の単相変圧器がある。Aは容量20 [kVA]，百分率インピーダンス降下5 [%]，Bは容量

60 [kVA], 百分率インピーダンス降下 3 [%] である。この 2 台の変圧器を並列に接続し，二次側に 72 [kVA] の負荷を接続した。各変圧器の分担負荷はいくらか。各変圧器の抵抗とリアクタンスの比は等しいものとする。

解答　式 (2) を用いて，

$$P_a = 72 \times \frac{\frac{20}{5}}{\frac{20}{5}+\frac{60}{3}} = 12\ [\mathrm{kVA}]$$

$$P_b = 72 \times \frac{\frac{60}{3}}{\frac{20}{5}+\frac{60}{3}} = 60\ [\mathrm{kVA}]$$

変圧器 A はまだ余裕があるが, 変圧器 B は定格いっぱいの負荷分担をしているため，72 [kVA] 以上の負荷をかけることはできない。

問 5.　例題 1 の変圧器 A と B の百分率インピーダンス降下は等しい。あとどのくらい負荷をかけることができるか。

2. 三 相 結 線

（1） △－△ 結 線

図 4 において，対称三相電源の各端子を U，V，W とする。各変圧器 T_1，T_2，T_3 の一次側端子に，$\dot{V}_{UV}$ [V]，$\dot{V}_{VW}$ [V]，$\dot{V}_{WU}$ [V] の電圧が加わるように接続する。また，二次側端子においても同じように接続する。図 (a), (b) から，変圧器の各端子は，△に結線されていることがわかる。このような結線法を**△結線**といい，図 4 に示すように，一次側・二次側とも△結線したものを，変圧器の**△－△結線**という。

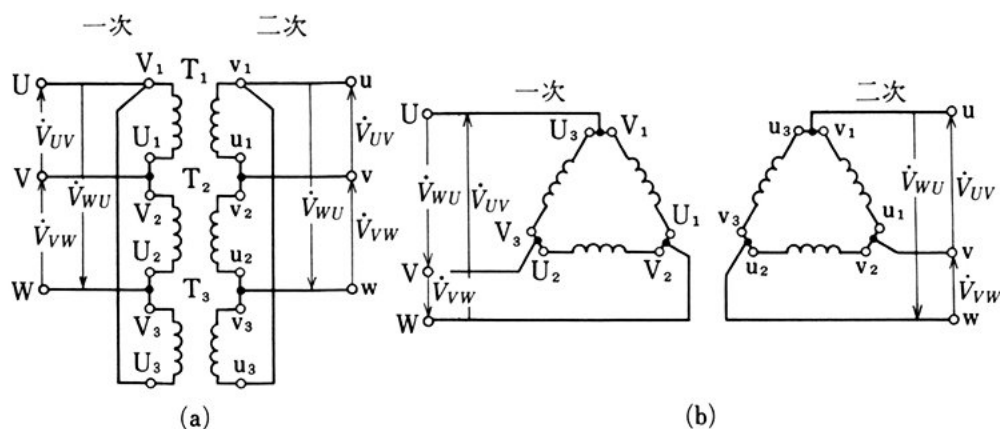



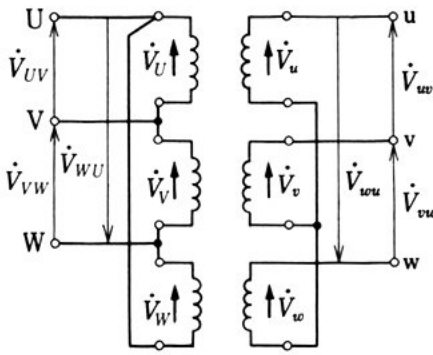
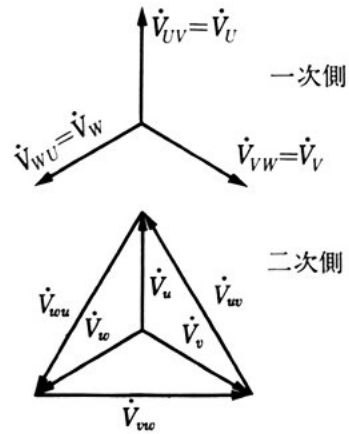
図4　△-△　結　線

なお，三相結線においても，各変圧器の極性を考えて結線を行わなければならない。また，変圧器は平衡運転の条件を備えているものを使用する必要がある。もし，条件が満たされていないと，各変圧器の電圧が異なっているのと同じ結果になり，各端子の電圧が不平衡になる。

△-△結線は，線間電圧と変圧器巻線の電圧が等しいため，高圧用としては，絶縁の点で不利となって用いられないが，60 [kV] 以下の配電用変圧器に用いられる。

問 6. 図4において，変圧器 T_1 の二次側の極性を誤って接続すると，どうなるか。

(2)　△-Y　結　線

図4(a)の各変圧器の一次側は△結線のままにしておき，二次側を図5(a)のように接続する方法を，変圧器の**△-Y 結線**という。この結線のベクトル図を図(b)に示す。図において，一次電圧 $\dot{V}_{UV}$ [V] と二次電圧 $\dot{V}_{uv}$ [V] の位相差を**角変位**といい，$\dot{V}_{UV}$ [V] を基準にして，$\dot{V}_{uv}$ [V] の位相角を時計回りに測った角で表す。したがって，図

（a）結線図

（b）ベクトル図

図 5　△-Y 結線

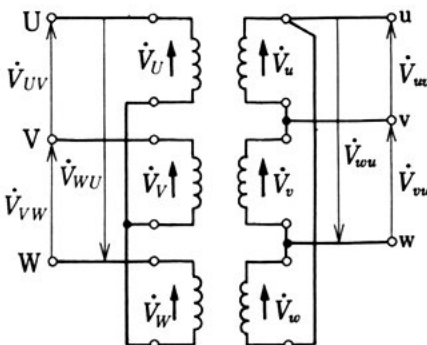
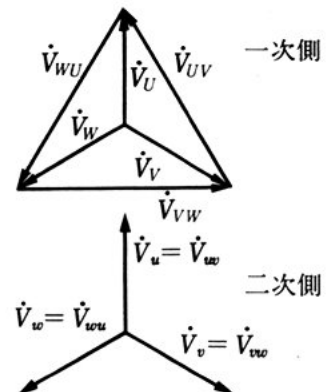
5 の場合の角変位は，330° である。

△-Y 結線では，二次側の線間電圧は，相電圧の $\sqrt{3}$ 倍になるので，送電線の送電端（発電所）などのように，電圧を高くする場合に用いられる。

問 7.　図 5 の角変位が 330° であることを確かめよ。

（3）　Y-△　結　線

図 6（a）に示すように，各変圧器の一次側を Y 結線，二次側を△結

図 6　Y-△　結　線

（a）結線図

（b）ベクトル図

線したものを，変圧器の **Y－△結線**という。この結線の電圧ベクトル図は，図(b)に示すようになり，二次側では，線間電圧と相電圧は等しい。

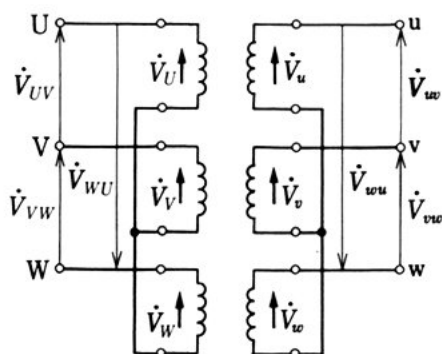
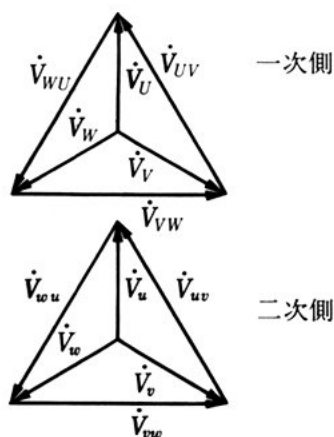
Y－△結線は，送電線の受電端などのように，電圧を低くする場合に用いられる。

問 8.　図6の場合の角変位はいくらか。

(4)　Y－Y　結　線

図7(a)に示すように，各変圧器の一次および二次側をY結線したものを，変圧器の **Y－Y 結線**という。図(b)は，一次側・二次側の電圧ベクトル図である。

各変圧器の励磁電流には，基本波のほかに第3調波が含まれており，この第3調波は，位相角が各相ともに同相である。したがって，Y－Y結線には，第3調波の流れる回路がないため，電圧波形がひずみ，これが原因となって，近くの通信線に雑音などの障害を与える。このため，Y－Y結線は，変圧器の絶縁が他の方法より容易であるなどの利点があるが，特別な場合のほかは使用されない。

図7　Y－Y　結　線

(a) 結線図

(b) ベクトル図

問 9. 励磁電流に第3調波が含まれていないと，電圧波形はどうなるか。

(5) V－V 結 線

単相変圧器2台を用いて，各変圧器の一次側および二次側を，図8(a)に示すように結線する方法を，**V－V 結線**という。3台の単相変圧器を用いて△－△結線したものから，1台の変圧器を取り除くとV－V 結線になる。

結線は，各変圧器の端子記号に注意して，図8(b)のように行う。

図9(a)の結線において，一次側に対称三相電圧 $\dot{V}_{UV}$ [V]，$\dot{V}_{VW}$ [V]，$\dot{V}_{WU}$ [V] を加えたとき，二次側の各線間電圧は，一次側に加えた電圧 $\dot{V}_{UV}$ [V] によって，変圧器 T_1 の一次巻線に $\dot{V}_U$ [V] の電圧が誘導され，二次巻線には $\dot{V}_u$ [V] の電圧が誘導される。また，同様に，T_2 の各巻線には $\dot{V}_V$ [V]，$\dot{V}_v$ [V] の電圧が誘導される。このことから，図9(b)の二次線間電圧 $\dot{V}_{uv}$ [V]，$\dot{V}_{vw}$ [V] および，図(a)から，端子 w，u 間の電圧 $\dot{V}_{wu}$ [V] の間には次の関係がある。

$$\dot{V}_{wu}=-(\dot{V}_{uv}+\dot{V}_{vw}) \qquad (3)$$

図8 V－V 結線

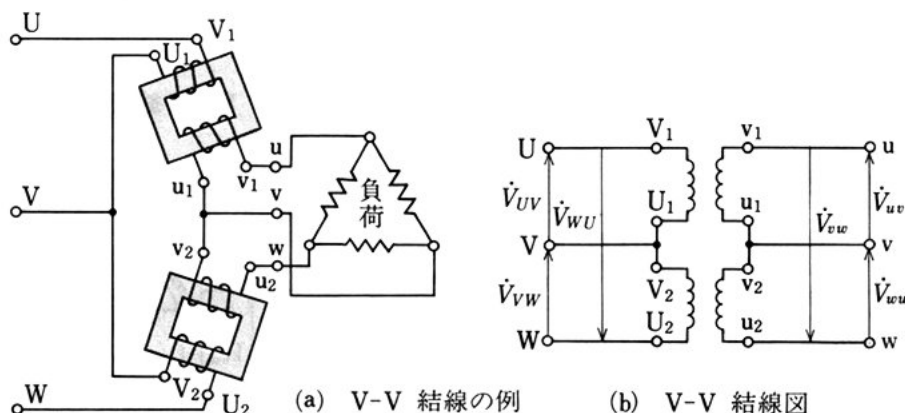
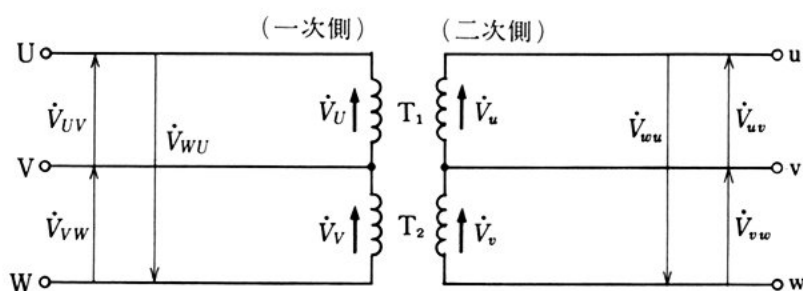
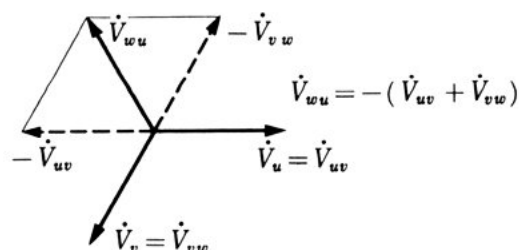
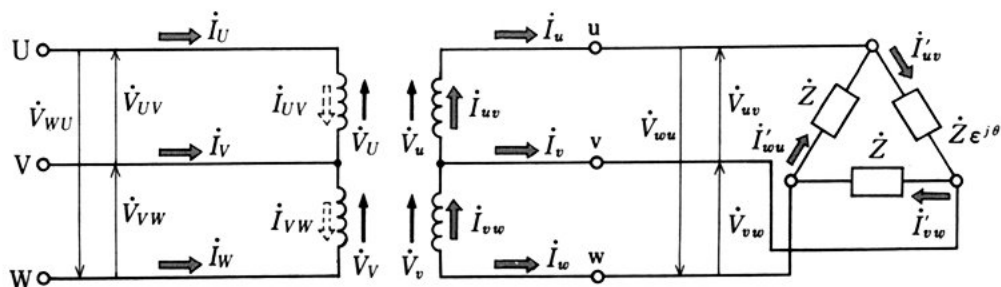
(a) V-V 結線の例　(b) V-V 結線図

(a) V－V結線

(b) 二次側の電圧のベクトル図

図 9　V－V 結線と三相電圧

各電圧の関係をベクトル図に示すと，図(b)になり，$\dot{V}_{uv}$ [V]，$\dot{V}_{vw}$ [V]，$\dot{V}_{wu}$ [V] は対称三相電圧であることがわかる。

負荷および各巻線に流れる電流は，図10に示すように，変圧器の二次側に平衡三相負荷を接続すると，各負荷に流れる相電流 $\dot{I}'_{uv}$ [A]，$\dot{I}'_{vw}$ [A]，$\dot{I}'_{wu}$ [A]，二次側の各線に流れる電流 $\dot{I}_u$ [A]，$\dot{I}_v$ [A]，$\dot{I}_w$ [A] の間には，次の関係がある。　5

図 10　V－V 結線の電圧・電流

$$\dot{I}_u=\dot{I}'_{uv}-\dot{I}'_{wu},\quad \dot{I}_v=\dot{I}'_{vw}-\dot{I}'_{uv},\quad \dot{I}_w=\dot{I}'_{wu}-\dot{I}'_{vw} \quad (4)$$

また，各変圧器に流れる電流 $\dot{I}_{uv}$ [A]，$\dot{I}_{vw}$ [A] は，次の式で表される。

$$\dot{I}_{uv}=\dot{I}_u,\qquad \dot{I}_{vw}=-\dot{I}_w \quad (5)$$

なお，変圧器の一次巻線に流れる電流 $\dot{I}_{UV}$，$\dot{I}_{VW}$ [A] は，変圧比 a を用いると，二次巻線電流に対して，次の式で表される。

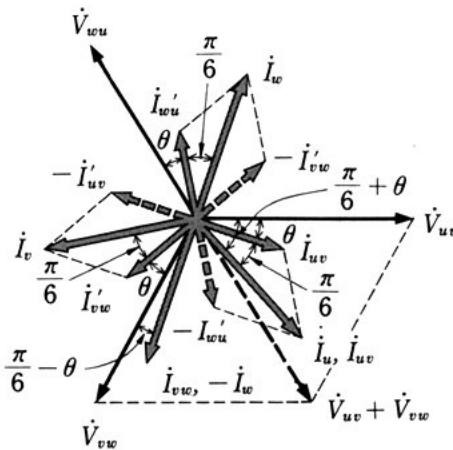
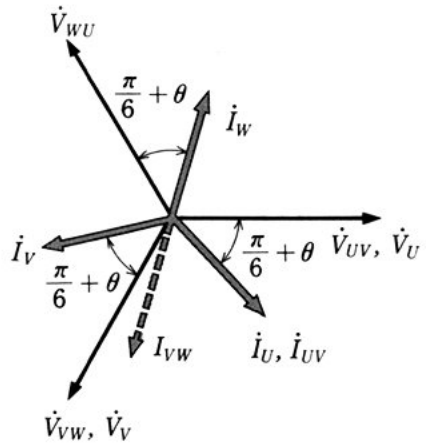
$$\dot{I}_{UV}=\frac{1}{a}\dot{I}_{uv}=\dot{I}_U,\qquad -\dot{I}_{VW}=-\frac{1}{a}\dot{I}_{vw}=\dot{I}_W \quad (6)$$

以上の電圧や電流の関係をベクトル図に示すと，図 11 になる。

変圧器 T_1 の出力を P_1 [W]，変圧器 T_2 の出力を P_2 [W] とすると，V - V 結線の出力 P_V [W] は，次の式で表される。

$$P_V=P_1+P_2=V_uI_{uv}\cos\left(\frac{\pi}{6}+\theta\right)+V_vI_{vw}\cos\left(\frac{\pi}{6}-\theta\right) \quad (7)$$

線間電圧および負荷は平衡しているので，定格状態では，$V_u=V_v=V_n$，$I_{uv}=I_{vw}=I_n$ と置くと，式 (7) は式 (8) で表される。

図 11　V - V 結線のベクトル図

$$P_V = V_n I_n\left\{\cos\left(\frac{\pi}{6}+\theta\right)+\cos\left(\frac{\pi}{6}-\theta\right)\right\}=\sqrt{3}\ V_n I_n \cos\theta$$

$$=\sqrt{3}\ P\cos\theta \qquad (8)$$

式（8）から，V－V 結線の最大出力［VA］は，変圧器1台の容量 $P\ (=V_n I_n)$ の $\sqrt{3}$ 倍になることがわかる。このことから，V－V 結線の変圧器の利用率は，次の式から求められる。

$$利用率=\frac{\sqrt{3}\ V_n I_n}{2V_n I_n}=\frac{\sqrt{3}}{2}=0.866 \qquad (9)$$

また，△－△結線の出力 P_Δ を $P_\Delta=3P$，V－V 結線の出力 P_V を $P_V=\sqrt{3}\,P$ とすると，出力比 $\frac{P_V}{P_\Delta}$ は，次の式から求められる。

$$\frac{P_V}{P_\Delta}=\frac{\sqrt{3}\,P}{3P}=\frac{1}{\sqrt{3}}=0.577 \qquad (10)$$

問 10. 20［kVA］の単相変圧器2台を用いてV－V結線にし，三相変圧を行う場合，これに接続できる三相負荷はいくらか。

問　　題

1. 図12の T_1，T_2 は定格が等しい変圧器である。次の問いに答えよ。
   (1) T_1 の二次側端子 ① の記号を示せ。
   (2) T_2 の一次側端子 ② の記号を示せ。

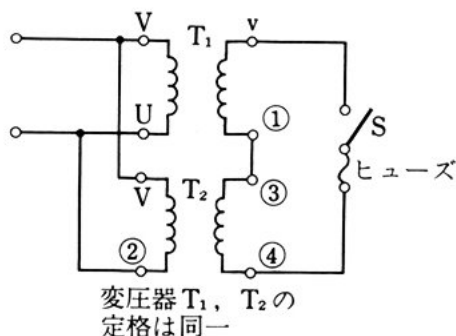



図 12

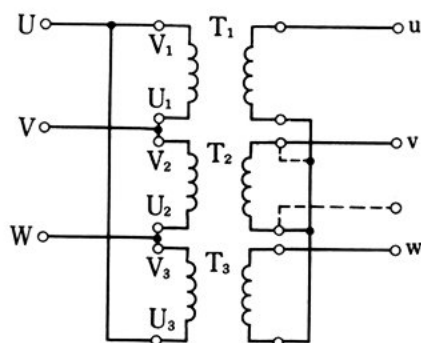



図 13

(3) スイッチSを閉じたとき，ヒューズが溶断した場合と，溶断しない場合の③，④の記号を示せ。

2. 図13に示すように，同一定格の変圧器3台を用いて，三相変圧を行いたい。次の問いに答えよ。ただし，変圧器はすべて減極性とする。

(1) 一次側と二次側の結線は，それぞれ何結線か。

(2) 変圧器 T_2 の接続を間違って破線のように接続した。各端子間に現れる電圧はどうなるか。

3. 定格容量10 [kVA]，二次定格電圧200 [V] の単相変圧器が3台ある。次の問いに答えよ。ただし，変圧器の巻数比は15である。

(1) △-△結線のときの三相出力はいくらか。

(2) 変圧器を2台用いてV-V結線としたときの三相出力はいくらか。

(3) △-△結線とし，定格負荷を接続したときの一次電流・二次電流および，巻線に流れる電流はいくらか。

4. 単相変圧器3台を用いて△-Y結線とし，三相電圧20000 [V] を6000 [V] に下げて，5000 [kW]，力率80 [%] の三相負荷に電力を供給している。変圧器1台の容量，および一次電流と二次電流を求めよ。

5. 巻数比15の単相変圧器3台を用いてY-△結線とし，二次線間電圧200 [V] で，三相平衡負荷100 [kVA] に電力を供給している。変圧器の一次巻線・二次巻線に流れる電流，および一次線間電圧はいくらか。

6. 50 [kVA] の単相変圧器3台を用いて△-△結線とし，150 [kVA] の電力を供給している。1台の変圧器が故障したのでV-V結線にした。負荷の大きさはいくらにしなければならないか。

4 各種変圧器

この節の目標　これまでは，単相変圧器について学んできたが，変圧器にはこのほか，発変電所などで多く使われている三相変圧器，出力電圧の調整に用いられる単巻変圧器などがある。また，ネオン変圧器として広く用いられている磁気漏れ変圧器，いろいろな高圧実験に使われている試験用変圧器など，特殊な構造の変圧器もある。

ここでは，これらの変圧器の原理・構造・利用などについて学ぶ。

1. 三相変圧器

(1) 構　造

送電系統などに用いられる大電力用の変圧器は，ほとんど三相変圧器である。その例を図1に示す。この三相変圧器にも，単相変圧器と同じように，内鉄形と外鉄形のものがある。

図1　三相変圧器

内鉄形　図2(a)に示すように，内鉄形三相変圧器では，鉄心の各脚部に，各相の一次巻線および二次巻線が巻いてある。この一次巻線を三相結線し，これに対称三相電圧を加えるとき，各巻線に生じる磁束を，それぞれ $\dot{\Phi}_U$ [Wb]，$\dot{\Phi}_V$ [Wb]，$\dot{\Phi}_W$ [Wb] とする。このとき，鉄心の①の部分を通る磁束 $\dot{\Phi}_0$ [Wb] は，次の式で表される。

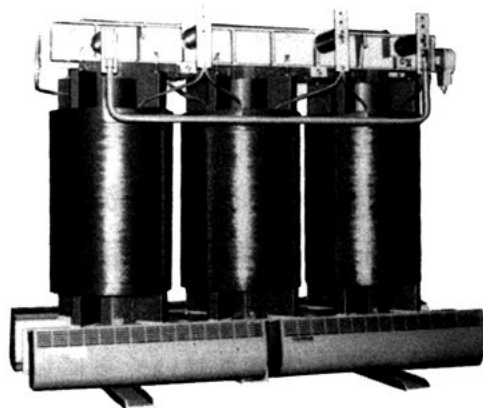
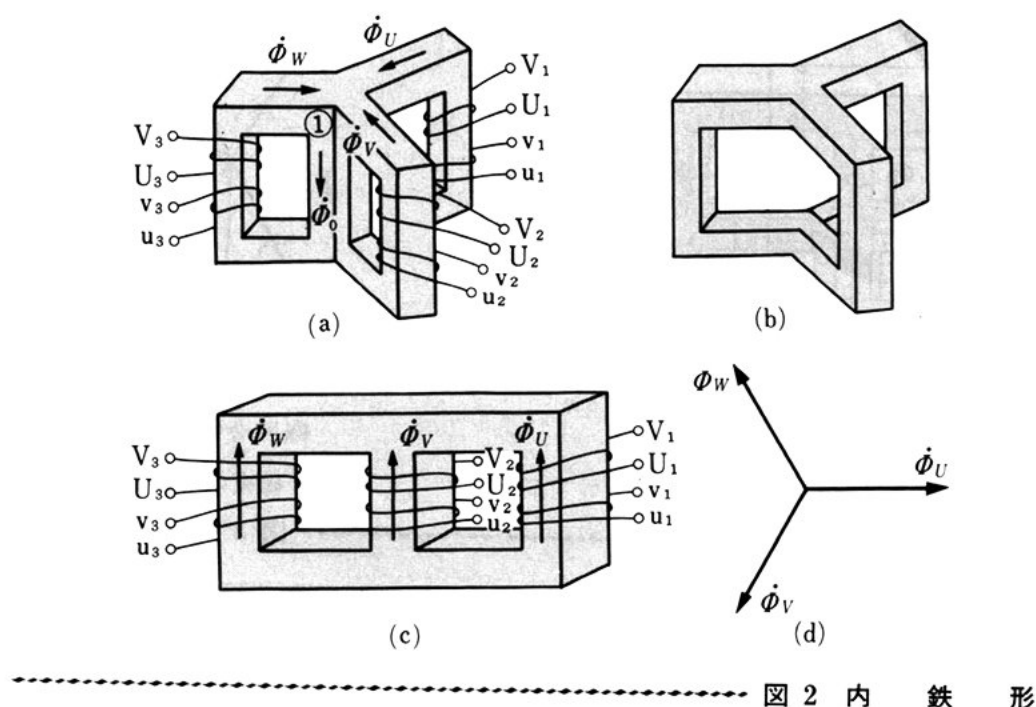



図 2 内　鉄　形

$$\dot{\Phi}_0 = \dot{\Phi}_U + \dot{\Phi}_V + \dot{\Phi}_W \quad (1)$$

なお磁束は，電圧より位相が $\frac{\pi}{2}$ [rad] だけ遅れる。一次電圧が対称三相電圧であるから，磁束も対称三相になり，式（1）は0となる。

$$\dot{\Phi}_0 = \dot{\Phi}_U + \dot{\Phi}_V + \dot{\Phi}_W = 0 \quad (2)$$

このことから，鉄心①の部分の磁束は0となり，この部分の鉄心は，図2(b)に示すように，なくてもよい。しかし，①の部分を取り除いた鉄心は，製作上不便であるため，実際には，図(c)のような平面的な鉄心を用いている。このようにすると，U，V，W の三相のうち，V相の磁路が他の2相の磁路より短くなるので，磁気抵抗が異なり，励磁電流が不平衡になるが，その値は小さいので，実用上支障はない。

外鉄形　図3(a)は，外鉄形三相変圧器の各巻線を示したものであり，三つの外鉄形単相変圧器を並べた構造になっている。

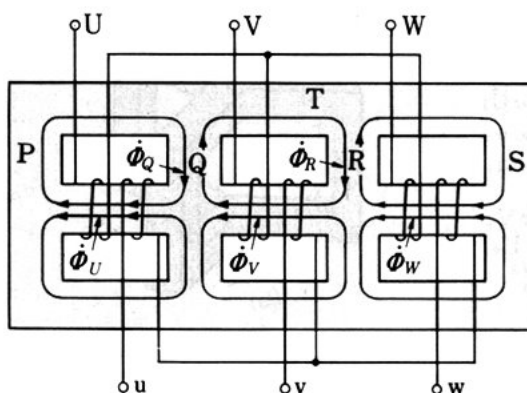
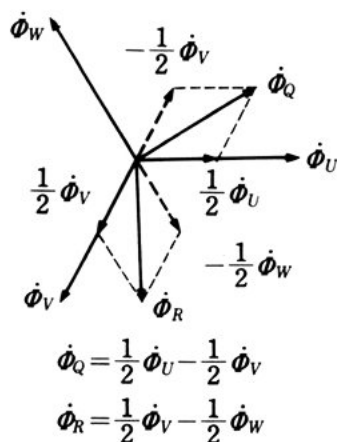
一次側に対称三相電圧を加えるとき，各巻線によっても，磁束 $\dot{\Phi}_U$

(a) 結線図

(b) 磁束のベクトル図

図3 外 鉄 形 (1)

[Wb]，$\dot{\Phi}_V$ [Wb]，$\dot{\Phi}_W$ [Wb] が生じる。この場合，鉄心の共通部分Q，R部の磁束$\dot{\Phi}_Q$ [Wb]，$\dot{\Phi}_R$ [Wb] は，次の式で表される。

$$\left.\begin{aligned}\dot{\Phi}_Q&=\frac{1}{2}\dot{\Phi}_U-\frac{1}{2}\dot{\Phi}_V\\ \dot{\Phi}_R&=\frac{1}{2}\dot{\Phi}_V-\frac{1}{2}\dot{\Phi}_W\end{aligned}\right\}\qquad(3)$$

図(b)のベクトル図から明らかなように，Q，R部の磁束は，P，S，T部の磁束の$\sqrt{3}$倍になる。したがって，Q，R部の磁束密度を他の部分と等しくするためには，鉄心の断面積を，P，T，S部の$\sqrt{3}$倍にしなければならない。

次に，図4(a)に示すように巻線を施した場合，$\dot{\Phi}_Q$ [Wb]，$\dot{\Phi}_R$ [Wb] は，次の式で表される。

$$\dot{\Phi}_Q=\frac{1}{2}\dot{\Phi}_U+\frac{1}{2}\dot{\Phi}_V,\qquad \dot{\Phi}_R=\frac{1}{2}\dot{\Phi}_V+\frac{1}{2}\dot{\Phi}_W\qquad(4)$$

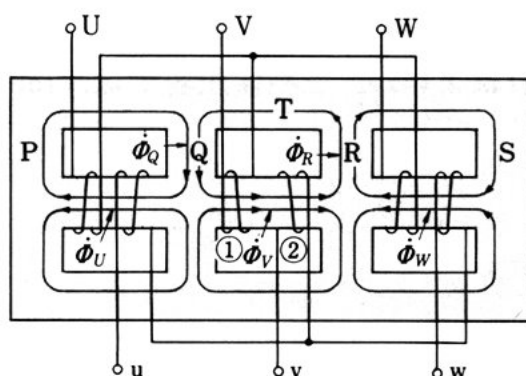
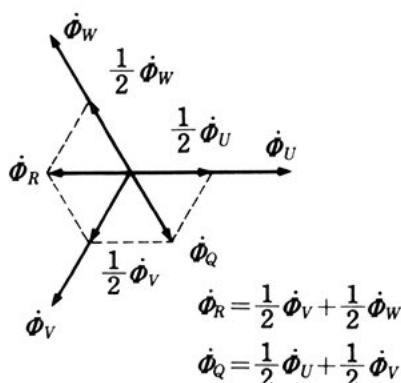
図(b)からわかるように，各部の磁束は等しくなり，Q，R部の断面は，P，T，S部と等しくできる。このことから，外鉄形では，図4(a)に示すように，①，②の部分の巻線を巻く向きを，他の二つの巻線の向きと反対にする。

(a) 結線図　　(b) 磁束のベクトル図

図 4 外 鉄 形 (2)

問 1. 図 2(c)において，V 相の励磁電流は，他の励磁電流より大きくなるか，小さくなるか。

問 2. 内鉄形と外鉄形の変圧器は，巻線上どんな点が違うか。

(2) 三相変圧器と単相変圧器 3 台の得失

三相変圧器および，単相変圧器 3 台による三相結線には，それぞれ次に示す特徴がある。

三相変圧器の利点

1) 鉄心材料が少なくてすみ，軽くすることができる。
2) 据え付け床面積が小さい。
3) ブッシングや油の量が少なく，価格も安い。
4) 結線が容易である。

単相変圧器 3 台の利点

1) △-△結線で 1 台が故障した場合，他の 2 台で V - V 結線にして運転し，その間，故障相の変圧器を修理することができる。三相変圧器の場合には，1 相が故障しても変圧器全体を交換しなければならない。
2) 予備の設備費が少なくてすむ。

例えば，150［kVA］の容量を必要とする場合，単相変圧器では，50［kVA］を予備として用意すればよいが，三相変圧器では，150［kVA］を準備する必要がある。

2. 特殊変圧器

（1） 単巻変圧器

原　理　単巻変圧器は，図5に示すように，巻線は一つしかなく，巻線の一部から端子が出ている。図において，巻線の共通部分 ab を**分路巻線**，共通でない部分 bc を**直列巻線**という。

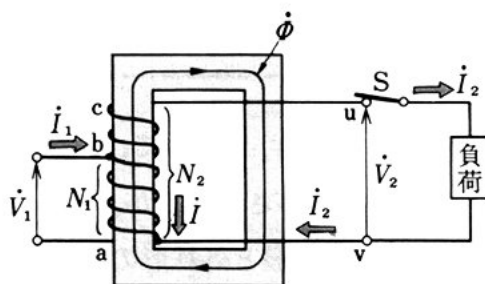



図5 単巻変圧器

分路巻線の巻数を N_1，全体の巻数を N_2 とすると，分路巻線に加える電圧 $\dot{V}_1$［V］と，全体の巻線に誘導される電圧 $\dot{V}_2$［V］との間には，次の関係がなりたつ。通常 a は2以下に設計する。

$$\frac{V_1}{V_2}=\frac{N_1}{N_2}=a \qquad (5)$$

次に，二次側端子 u, v 間に負荷を接続したとき，流れる負荷電流を $\dot{I}_2$［A］，一次側に流れる電流を $\dot{I}_1$［A］とし，巻線の励磁電流を無視すると，$\dot{I}_1$ と $\dot{I}_2$ の間には，次の関係がなりたつ。

$$N_1(I_1-I_2)=(N_2-N_1)I_2 \qquad ゆえに，\frac{I_1}{I_2}=\frac{N_2}{N_1}=\frac{1}{a} \qquad (6)$$

また，分路巻線に流れる電流 $\dot{I}$［A］は，次の式で表される。

$$I=I_1-I_2=(1-a)I_1 \qquad (7)$$

容　量　単巻変圧器は，分路巻線を一次巻線，直列巻線を二次巻線として，ふつうの変圧器のように動作するから，その容量 P_s [VA] は，次の式で表される。

$$P_s = (V_2 - V_1) I_2 = \left(1 - \frac{V_1}{V_2}\right) V_2 I_2 = (1 - a) V_2 I_2 \qquad (8)$$

P_s は，変圧器自身の容量であるから，**自己容量**とよばれる。

図6において，二次端子 u，v から取り出せる出力 P_l [VA] は，次の式で表される。

$$P_l = V_2 I_2 \qquad (9)$$

この P_l を**負荷容量**という。単巻変圧器の定格容量は，自己容量や負荷容量で表される。

なお，単巻変圧器は，一次巻線・二次巻線が共通であるため，漏れ磁束が少なく，電圧変動率も小さい。したがって，効率がよいので，電力系統の電圧調整や，すべり電圧調整器などに広く使われる。しかし，一次巻線と二次巻線が共通であるため，変圧比が大きくなると危険である。

（2）三巻線変圧器

図6(a)に示すように，三つの巻線をもつ変圧器を**三巻線変圧器**といい，それぞれの巻線を**一次巻線・二次巻線・三次巻線**という。

この変圧器は，力率の低い誘導性の負荷に電力を供給する場合などに適している。すなわち，図(a)に示すように，二次巻線に誘導性の負荷 $\dot{Z}$ [Ω] がある場合，三次巻線に進相用コンデンサ $\dot{Z}_C$ [Ω] を接続することによって，一次回路の力率を改善することができる。

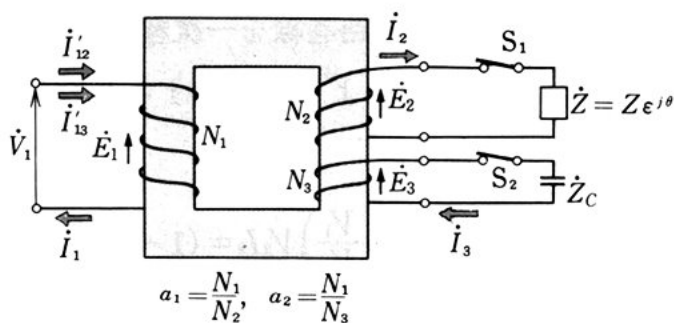
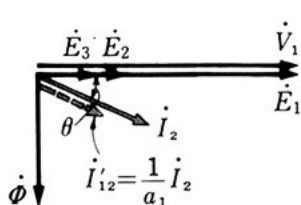
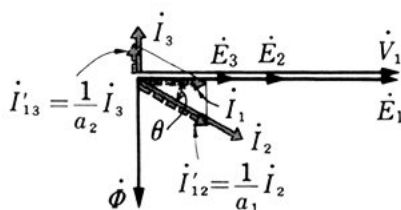
例えば，図(a)において，一次側に交流電圧 $\dot{V}_1$ [V] を加え，S_1 だけを閉じると，二次巻線には図(b)に示す遅れ電流 $\dot{I}_2$ [A] が流れ，一次巻線には一次電流 $\dot{I}'_{12} = \dfrac{1}{a_1} \dot{I}_2$ [A] が流れる。

(a) 三巻線変圧器

(b) S_1だけを閉じたとき

(c) S_1，S_2を閉じたとき

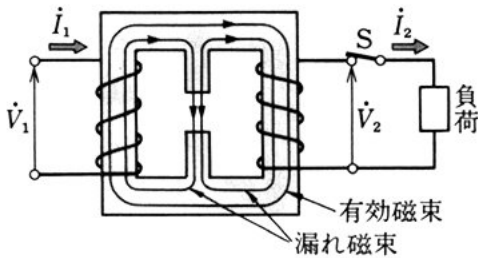
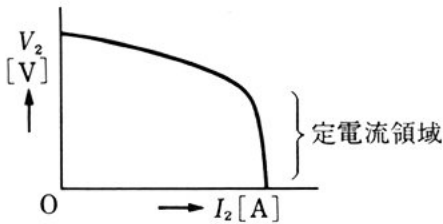
図 6　三巻線変圧器

次にS_2を閉じると，図(c)に示すように，三次巻線には電流$\dot{I}_3$[A]が流れ，一次巻線にはそれに応じた電流$\dot{I}'_{13}$[A]が，$\dot{I}'_{12}$[A]に加わって流れる。すなわち，一次電流$\dot{I}_1$[A]は，次の式で表される。

$$\dot{I}_1=\dot{I}'_{12}+\dot{I}'_{13}=\frac{1}{a_1}+\frac{1}{a_2}\dot{I}_3 \qquad (10)$$

図(c)からわかるように，三次巻線に進相用コンデンサを接続することによって，一次回路の力率を改善することができる。

(3)　磁気漏れ変圧器

図7(a)に示すように，磁路の一部にギャップがある鉄心に，一次巻線・二次巻線を巻いた変圧器を**磁気漏れ変圧器**という。この変圧器では，図(b)に示すように，負荷電流I_2[A]が増加すると，漏れ磁束が増加し，二次側端子電圧が急激に減少する。このような特性を示

(a) 原理図

(b) V_2-I_2 特性

(c) ネオン変圧器

図 7 磁気漏れ変圧器

す領域では，電圧が変わっても負荷電流が一定に保たれる。したがって，この特性は**定電流特性**とよばれる。磁気漏れ変圧器は，定電流特性をもつため，蛍光灯安定器，ネオンを点灯するためのネオン変圧器，アーク溶接機などに用いられる。

問 3. 磁気漏れ変圧器がネオン変圧器に適するのはなぜか。

3. 計器用変成器

(1) 変　流　器 (CT)

図 8 (a) に示す一次巻線・二次巻線の巻数がそれぞれ N_1，N_2 の変圧器がある。一次巻線に被測定電流 I_1 [A] を流し，二次電流 I_2 [A] を電流計 A で測定すると，I_1 は，次の式から求められる。

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{1}{a} I_2 = K I_2 \tag{11}$$

(a) (b)

図 8 変 流 器 (1)

(a) (b)

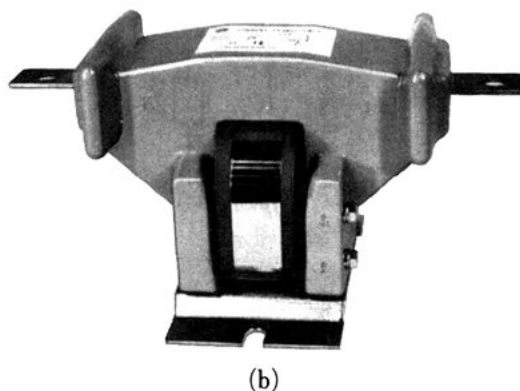
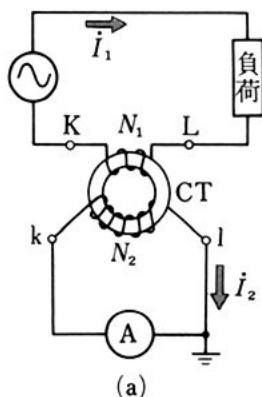
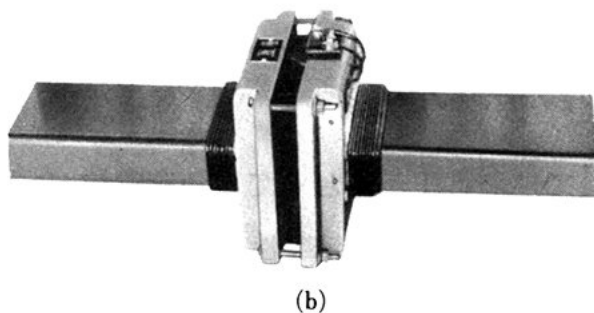
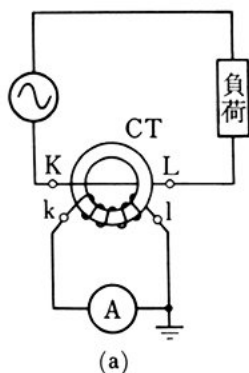



図 9 変 流 器 (2)

例えば，$N_1=10$，$N_2=100$ とすれば，$I_1=10I_2$ となる。それで，$I_2=2$ [A] であれば，$I_1=20$ [A] であるから，電流計Aが 2 [A] を指示しているときには，I_1 は 20 [A] であることがわかる。したがって，電流計Aの最大目盛が 5 [A] であれば，50 [A] まで測定できることになる。

このような目的で用いられる変圧器は，**変流器** (current transformer : **CT**) とよばれ，K の値は**変流比**という。

変流器には，図 8 (a) に示すように，一次巻線・二次巻線とも鉄心に巻いた巻線形や，図 9 (a) に示すように，一次巻線の代わりに 1 本の棒状導体を鉄心に貫通させる棒形がある。図 8 (b)，図 9 (b) は，そ

れぞれの外観を示したものである。

負　担　変流器には交流電流計や電力計の電流コイルなどが直列に接続されているので，変流器の二次側の負荷は電流計や電力計などである。変流器の二次定格電流は 1 [A] または 5 [A] に決められているので，交流電流計を接続する場合，変流器の定格電流に合わせた最大目盛 1 [A] または 5 [A] のものをつなぐことになる。この場合，計器ならびに配線のインピーダンスを 1.6 [Ω] とすれば，その皮相電力は 5×5×1.6＝40 [VA] である。このように，変流器から負荷に供給される皮相電力を**負担** (burden) という。一般に変流器を使用するときには，この負担に注意しなければならない。

なお，通電中に CT の二次側から計器を取り外す場合には，必ず二次側を短絡しておかなければならない。二次側を開放のままで，一次側に被測定電流を流すと，被測定電流がすべて励磁電流となり，CT のコイルに高圧が発生し，焼損するおそれがある。また，焼損しなくても人体に危険である。

(2) 計器用変圧器 (PT)

図 10 (a) に示す一次巻線・二次巻線の巻数がそれぞれ N_1，N_2 の変圧器がある。一次側に被測定電圧 V_1 [V] を加え，二次電圧 V_2 [V] を電圧計 V で測定すると，V_1 は，次の式から求められる。

$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 = K V_2 \qquad (12)$$

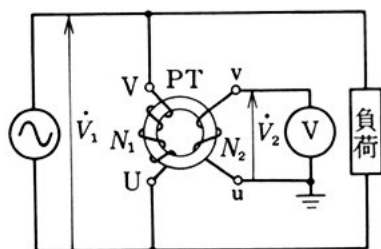
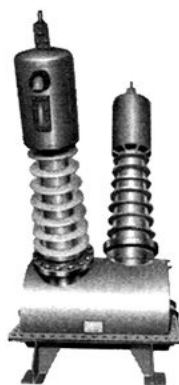
例えば，$\frac{N_1}{N_2} = 100$ であれば，電圧計 V が 100 [V] を指示しているときには，被測定電圧 $V_1 = 10000$ [V] であることがわかる。このような目的で用いられる変圧器は，**計器用変圧器** (potential transformer : **PT**) とよばれ，K の値は**変圧比**という。図 10 (b) は，計器用変圧器の外観を示したものである。

(a)

(b)

図 10　計器用変圧器

負　担　変流器の場合と同様に，計器用変圧器から負荷に供給される皮相電力 [VA] を負担という。計器用変圧器の二次定格電圧は 110 [V] に統一されており，電圧計には，最大目盛が 150 [V] と 120 [V] のものが用いられる。電圧が 110 [V] で負担が 100 [VA] であれば，負荷インピーダンスは 121 [Ω] であることがわかる。

（3） CT と PT の回路への接続

図 11 は，CT，PT を用いた回路の例である。CT は測定回路の接地側につなぐ。電流計の回路は，前に学んだとおり，二次側を開いてはならない。また，電気設備技術基準（第 26 条）によると，高圧（600 [V] を超える電圧）以上の場合，CT の二次側は接地* しなければならない。同様に高圧以上の場合，PT もその二次側は必ず接地** しなければならない。

問 4． CT と PT はどう違うか。

問 5． CT の二次側を接地するのは何のためか。

問 6． 図 11(b) で，PT，CT の K の値はそれぞれ 100，20 であり，電

---

*，**　接地することによって，CT，PT の一次・二次間に絶縁不良の状態があっても，人体に衝撃を与えない。

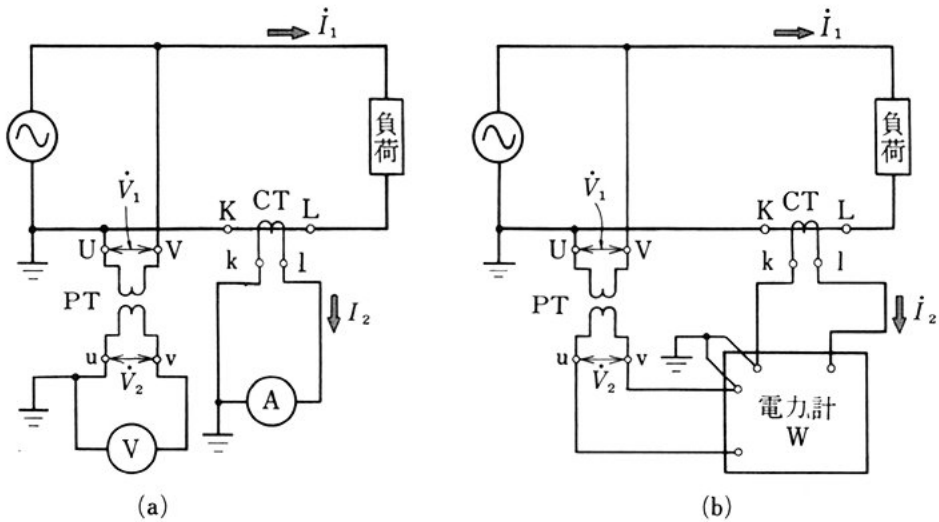



図 11　変流器と計器用変圧器の回路

力計 W の指示は 5 [kW] であった。回路の消費電力を求めよ。

(4) CT, PT を用いる利点

CT, PT を用いると，電流・電圧の測定範囲を拡大することができる。CT, PT を用いる利点として，次のことが挙げられる。

1) **通常の計器の使用**　大電流や，高電圧を測る必要がある場合でも，最大目盛が 5 [A], 150 [V] というような通常の電流計や電圧計を用いることができる。

2) **測定の安全**　大電流・高電圧の回路から絶縁された二次回路で，測定ができるので安全である。

3) **遠隔測定**　二次回路を長くすれば，大電流・高電圧の実際の回路から離れた場所で測定ができるので，計測の集中管理などに便利である。

問　　題

1. 予備費は，三相変圧器よりも単相変圧器3台の方が有利である。なぜか。

○修理費が少なくてすむ
○小形なので搬出入が容易

2. 図12の変圧器は，直列巻線の巻数が100，分路巻線の巻数が900である。二次電圧が1000［V］で，100［kW］の抵抗負荷を接続したときの各部の電流 I_1［A］，I_2［A］，I［A］および，一次電圧はいくらか。

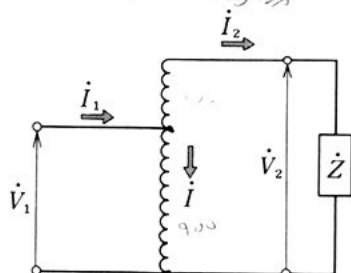



図 12

3. CTの二次側を開いたまま通電してはならない。なぜか。　しょうりゃく

4. 分流器や倍率器に比べて，CT，PTはどんな特徴があるか。

2. $N_1=900$　$N_2=1000$　$a=\frac{N_1}{N_2}=\frac{900}{1000}=\frac{9}{10}$

$I_2=\frac{100\times10^3}{1000}=100[A]$

$I_1=I_2\times\frac{1}{a}=100\times\frac{10}{9}=\frac{1000}{9}=111[A]$

$I=I_1-I_2=111-100=11[A]$

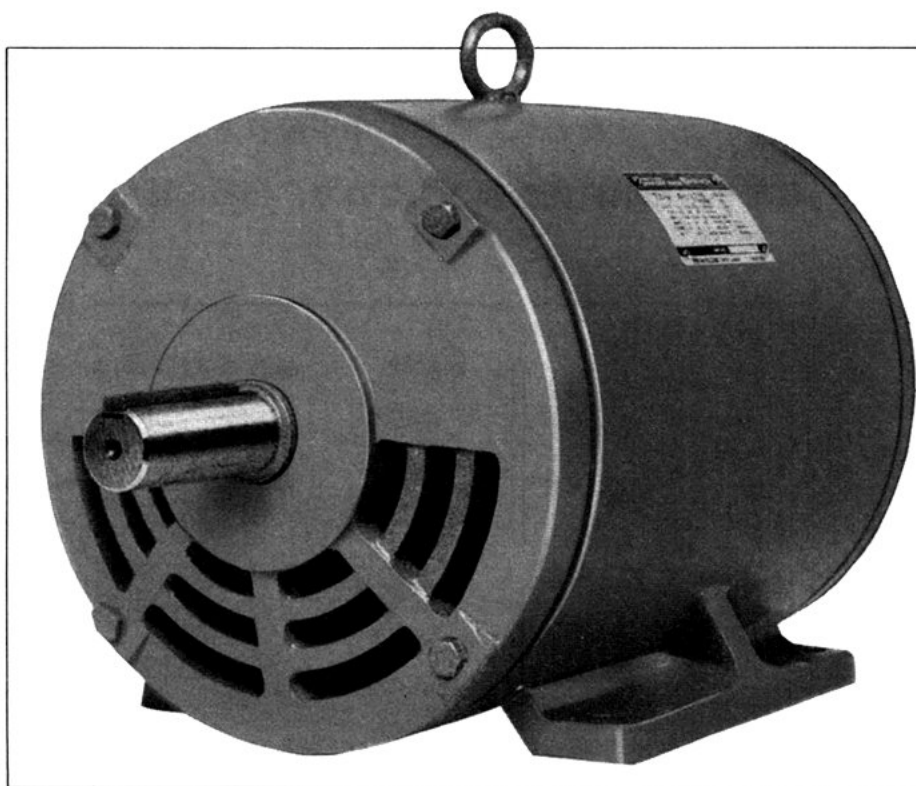
$V_1=V_2\times a=1000\times\frac{9}{10}=900[V]$

4. ・高電圧，大電流の一次回路から絶縁された二次回路でそくていできる。ので安全。
二次回路をえんちょうしてえんかくそくてい出来る。

第**4**章

誘導機

誘導機は，一方の巻線が他方の巻線から電磁誘導によって，エネルギーを受けて動作する交流機で，誘導電動機として広く利用されている。主として，産業用の動力用には三相誘導電動機が，家庭用の小動力用には単相誘導電動機が用いられている。

この章では，これらの原理・構造・特性・運転法および用途などについて調べる。また，直流電動機と同じような特性をもつ交流整流子電動機についても学ぶ。

三相かご形誘導電動機

1 三相誘導電動機

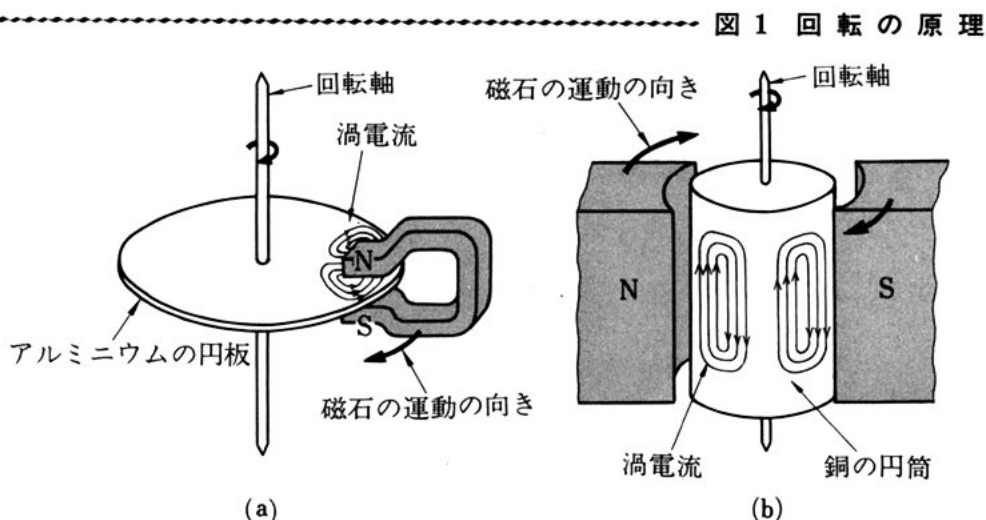
この節の目標　三相誘導電動機は，構造が簡単で，価格が安く，じょうぶで故障が少なく，取り扱いが容易であるなど，多くの特徴があるので，工場などにおける大動力用として，また揚水・工作用機械などの中小の動力用として，広く使用されている。

ここでは，三相誘導電動機の原理・構造・理論・特性・運転法および用途などについて調べる。

1. 三相誘導電動機の原理

(1) 回転の原理

図1(a)において，磁石を矢印の向きに動かすと，円板には，フレミングの右手の法則に従う向きに，渦電流が流れる。この電流は，磁極の真下すなわち，磁界の中を流れるので，円板は，フレミングの左手の法則に従う向きすなわち，磁石の移動と同じ向きに力を受

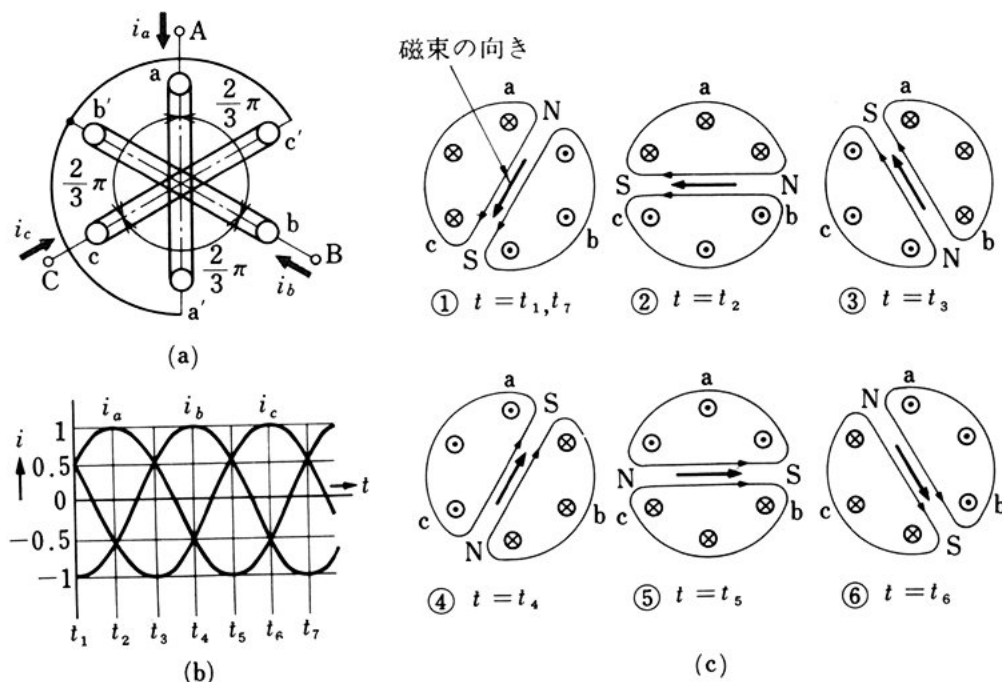
図1 回転の原理

ける。したがって，円板の軸は，磁石の移動する向きに回転する。

このことは，図(b)についてもいえる。磁石を回転させると，円筒には起電力が誘導され，渦電流が流れるので，この電流と磁束との間に力が働き，円筒の軸は磁石と同じ向きに回転する。これが**誘導電動機**(induction motor) とよばれるものの軸の回転原理である。

実際には，磁石を回転させて動力を得るのでは意味がないので，電気的な方法で，磁石を回転させたのと同じ効果があるように工夫されている。

(2) 2極の回転磁界

図2(a)に示すように，aa′, bb′, cc′ の三つのコイルを互いに $\frac{2}{3}\pi$ [rad] ずつずらして配置し，図(b)に示す三相交流を流すと，各時刻における合成磁束の向きは，図(c)に示すようになる。例えば，時刻

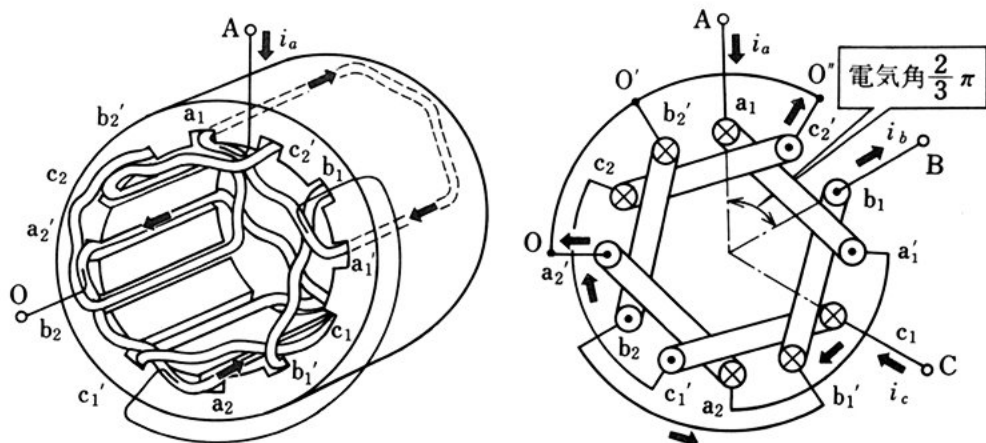
図 2 2極の回転磁界

t_1 においては，各コイルには，図(c)の①に示す向きの電流が流れ，合成磁束は矢印の向きになる。したがって，時刻 t_1 から t_7 までの電流変化の1周期の間に合成磁束は1回転して，時刻 t_1 のときと同じ向きになる。

すなわち，電流が1周期流れる間に，回転磁束も1回転することになる。この場合，各時刻において，磁界の向きを示すN，Sは一組あり，**2極の回転磁界**とよばれる。また，この巻線の配置のしかたを採用している誘導電動機は，**三相2極誘導電動機**とよばれる。したがって，f [Hz] の交流では，回転磁束は1秒間に f 回転する。

問 1.　2極の場合，50 [Hz] では，回転磁界は1秒間に何回転するか。

（3）　多極の回転磁界

図3に示すように，コイル a_1a_1'，a_2a_2'，をa相とし，これと同じ

図 3　4極巻コイルの配置と接続

a相だけの結線を示す。b, c相も同様に結線する。

(a)　コイルの配置

電流は，図2(b)の時刻 t_1 における向きを示す。

(b)　コイルの三相結線

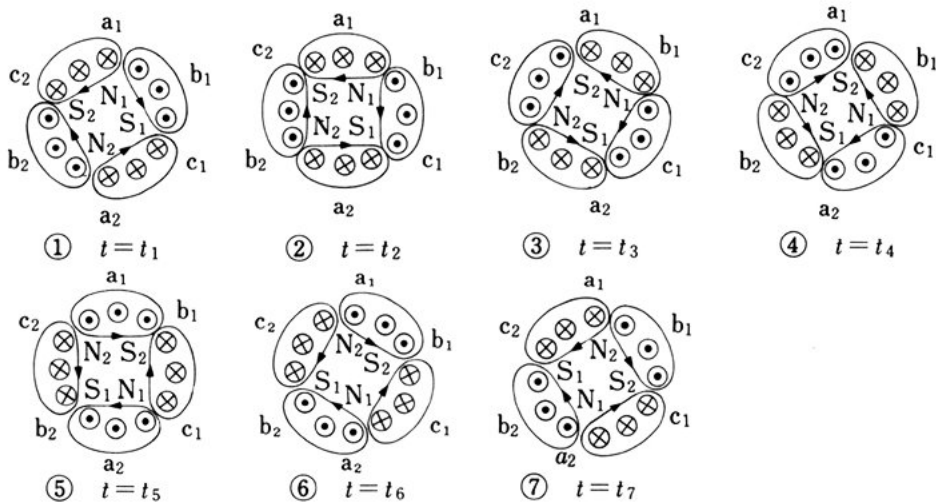



図 4　4 極の回転磁界

に電気角* で$\frac{2}{3}\pi$ [rad] ずつずらして，コイル b_1b_1'，b_2b_2' (b 相)，コイル c_1c_1'，c_2c_2' (c 相) を三相結線し，これに図 2 (b) に示す三相交流を流す。いま，a 相の電流 i_a が正のとき，電流の向きを図に示すように $A \to a_1 \to a_1' \to a_2 \to a_2' \to O$ の向きに定めれば，図 2 (b) の時刻 t_1 では i_a，i_c が正，i_b が負であるから，各コイルの電流の向きは，図 3 (b) および図 4 の ① に示すようになり，N, S の磁極が 2 組(N_1, S_1 と N_2, S_2) できることがわかる。このようなコイルは **4 極巻** とよばれ，時刻 t_1 から t_7 まで電流変化の 1 周期の間に合成磁束は $\frac{1}{2}$ 回転する。一般に，p 極の場合には $\frac{2}{p}$ 回転することになるから，交流の周波数を f [Hz] とすれば，回転磁界の回転速度 n_s [rpm] は，次の式で表される。

$$n_s = \frac{2f}{p} \times 60 = \frac{120f}{p} \qquad (1)$$

* 隣り合う磁極 N，S 間の角度を電気的に π [rad] と考え，これによって表した角度が**電気角**である。極数が p の場合の電気角はふつうの角度の $\frac{p}{2}$ 倍である。

このように，極数 p と周波数 f [Hz] で決まる回転速度 n_s [rpm] を**同期速度**という。

問 2. 周波数 f が 50 [Hz]，極数 p が 4 のとき，回転磁界の回転速度 n_s [rpm] を求めよ。

問 3. 周波数 f が 60 [Hz] のとき，8 極の場合の回転磁界の回転速度 n_s [rpm] はいくらか。

2. 三相誘導電動機の構造

（1） 固　定　子

固定子は，固定子枠・鉄心・巻線の三つの部分からなりたっている。

鉄　心　鉄心材料には，厚さ 0.35 [mm] または，0.5 [mm] のけい素鋼板（けい素の含有率 1〜3.5 [%]）が用いられている。これを必要な枚数だけ積み重ねて成層鉄心とする。図 5 (a) は，1 枚のけい素鋼板であり，これに巻線を収めるためのスロットが打ち抜いてある。図 (b) は，けい素鋼板を重ね合わせた鉄心であり，これを図 (c) の固定子枠で保持している。

巻　線　三相交流を流すためのコイルで，図 6 に示すきっこう

図 5　誘導電動機の固定子

(a)　固定子用けい素鋼板　(b)　重ね合わせた鉄心　(c)　固定子枠

(a) きっこう形コイルの例　(b) スロットと二層巻(E種絶縁)　(c) スロットの種類

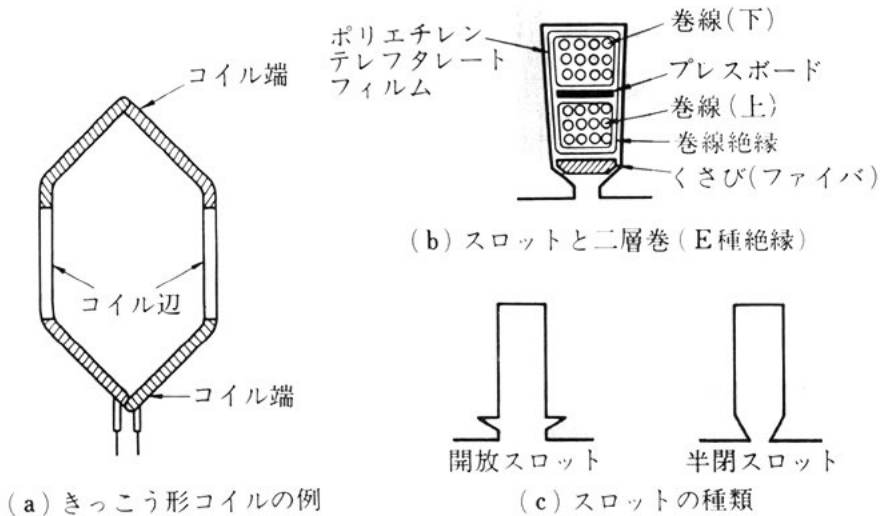



図 6　巻線とスロット

形にするのがふつうである。小電力用電動機の巻線には，ホルマール線やポリエステル線などの丸線が用いられ，大電力用では，ガラス巻線の平角導線が用いられる。なお，図6(a)の巻線は，図(b)に示すように，コイル絶縁を介してスロットの中に収められる。スロットには，図6(c)に示す開放形と半閉形がある。スロットの中の巻線は，動かないようにくさびを入れて固定する。

問 4. けい素鋼板を重ね合わせて鉄心とするのはなぜか。

問 5. スロットにコイル絶縁を施すのはなぜか。

(2) 回　転　子

回転子は，円筒状の銅筒でもよいと思われるが，大きな誘導電流を流して，大きな回転力を得る必要があり，図7に示すものが工夫されている。

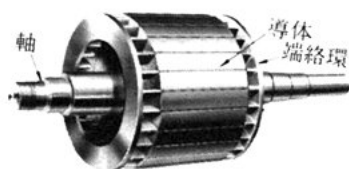
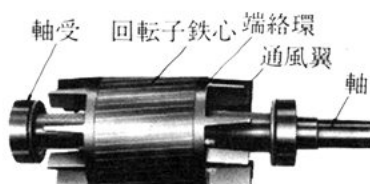
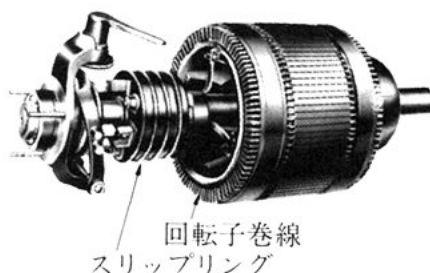
かご形回転子は，成層鉄心のスロットに，絶縁しない棒状の導体を差し込み，その両端を太い銅環で短絡して作られる。この短絡用の銅環を **端絡環** という。**ダイカスト回転子** は，15 [kW] 以下の誘導電動機に用いられ，高い純度のアルミニウムを，スロットに加圧鋳入

(a) かご形回転子

(b) ダイカスト回転子

(c) 巻線形回転子

図7 回 転 子

したものである。図7(b)に示すように，端絡環・通風翼が一体となっている。これらの回転子が用いられる誘導電動機は，**三相かご形誘導電動機**とよばれる。

巻線形回転子は，固定子と同じように，成層鉄心に，絶縁電線を用いて三相巻線を施したものである。この回転子巻線の端子は，図7(c)に示すように，スリップリングという環状の導体に接続され，さらにブラシを通して抵抗器を接続することにより，始動特性を改善したり，速度制御をすることができる*。このような誘導電動機は，**三相巻線形誘導電動機**とよばれる。

誘導電動機の特徴　誘導電動機は，直流電動機に比べて次のような特徴がある。

1) 整流子がいらないので，構造が簡単である。

2) とくに，かご形誘導電動機は，回転子に棒状の導体を用いているので，かこくな使用に耐えられる。

* このことについては139〜144ページで学ぶ。

このようなことから，誘導電動機は，ポンプ・巻上機・工作機械などに広く使われている。

問 6． かご形回転子と巻線形回転子は，導体にどんな違いがあるか。

3．三相誘導電動機の理論

(1) す　べ　り

誘導電動機の回転子が止まっていれば，回転子導体には大きな誘導電流 I [A] が流れ，すでに直流電動機で学んだように，トルク T [N・m] は，磁束 Φ [Wb] と電流 I [A] の積に比例するから，$T=k\Phi I$ [N・m] のトルクが生じて，回転子は回転する。その回転速度が増して，同期速度 n_s [rpm] に近づくと，回転子導体の電流は減少し，トルク T は小さくなる。回転子の回転速度 n [rpm] は，同期速度 n_s より小さく，n_s に対する n_s と n の差は**すべり** (slip) とよばれ，s で表される。

$$s=\frac{\text{同期速度}-\text{回転速度}}{\text{同期速度}}=\frac{n_s-n}{n_s} \qquad (2)$$

なお，すべり s は，回転子が停止しているとき $(n=0)$ を 100 [%] として，パーセントで表すことが多い。全負荷（定格出力に相当する負荷）における s の値は，小形の電動機では 5～10 [%]，中・大形の電動機では 3～5 [%] の程度である。大形の電動機は，機械的な負荷の変動に対する回転速度の変化が小さい。

例題 1． 同期速度 n_s が 1500 [rpm]，回転速度 n が 1450 [rpm] のときのすべり s を求めよ。

解答 $s=\frac{n_s-n}{n_s}=\frac{1500-1450}{1500}=0.0333=3.33$ [%]

問 7． 式 (2) から回転速度 n は $n=n_s(1-s)$ で表されることを導け。

(2) 誘導起電力

誘導電動機において，固定子巻線を一次巻線，回転子巻線を二次巻線と考えると，すでに学んだ変圧器と同じようにして，取り扱うことができる。

変圧器では，一次巻線の励磁電流によって生じた鉄心中の磁束が二次巻線と鎖交して，二次巻線に起電力が誘導され，二次負荷電流が流れる。この二次負荷電流によって生じた起磁力を打ち消すように一次負荷電流が流れ込み，鉄心中の磁束は一定となる。

誘導電動機では，固定子巻線（一次巻線）に励磁電流が流れると，回転磁界が生じ，これが回転子巻線（二次巻線）を切るので，回転子巻線に起電力が誘導される。それによって，回転子巻線に電流が流れる。その電流によって生じる起磁力を打ち消すように，固定子巻線に電流が流れ，固定子と回転子の間のエアギャップの磁束を一定に保つ。

なお，変圧器は，電力を一次巻線から二次巻線に伝達するだけである。それに対して誘導電動機は，電力を機械的な出力に変換する働きをもっている。また，変圧器では，一次電流と二次電流は周波数が同じであるが，誘導電動機では，次に説明するように周波数が異なる。

回転子が停止しているとき（$s=1$のとき）は，一次巻線に流れる励磁電流によって生じる回転磁界は，一次巻線を切るのと同じ速さで二次巻線を切るから，一次巻線・二次巻線の各相は，変圧器と同じように，一次誘導起電力 E_1，および二次誘導起電力 E_2 を生じる*。

* $E_1=4.44k_1w_1f_1\phi$，$E_2=4.44k_2w_2f_2\phi$，ただし w_1，w_2 は，一次巻線・二次巻線の各1相の巻数，k_1，k_2 は巻線のしかたによって決まる定数で，**巻線係数**とよばれる。

回転子が n [rpm] の速度で回転しているときは，回転磁界と回転子の相対速度は $n_s - n = sn_s$ で，回転子が停止しているときの s 倍となる。したがって，運転中の二次誘導起電力 E_2' [V] および周波数 f_2 [Hz] とも，式（3），（4）に示すように，停止時の s 倍となる。

$$E_2' = sE_2 \tag{3}$$

$$f_2 = sf_1 \tag{4}$$

ただし，f_1 は一次巻線に加えた電源の周波数で，f_2 すなわち sf_1 は回転子巻線に流れる電流の周波数であり，**すべり周波数** とよばれる。

問 8. 電源の周波数 f_1 が 50 [Hz]，8 極の誘導電動機の回転速度 n が 700 [rpm] のとき，すべり周波数 sf_1 [Hz] を求めよ。

問 9. 誘導電動機は，運転中に二次回路の周波数 f_2 [Hz] が変わるのはなぜか。

（3） 二 次 電 流

回転子巻線（二次巻線）の 1 相分の抵抗を r_2 [Ω]，漏れインダクタンスによる周波数 f_1 [Hz] におけるリアクタンスを x_2 [Ω] とすると，すべり s で運転している誘導電動機の二次誘導起電力は sE_2 [V]，リアクタンスは sx_2 [Ω] となるから，その回路は図 8 (a) のようになる。したがって，二次電流 I_2 [A] は，次の式で表される。

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{{r_2}^2 + (sx_2)^2}} \tag{5}$$

この式を変形すると，式（6）になる。

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + {x_2}^2}} \tag{6}$$

この式は，図 8 (b) に示すように，抵抗を $\frac{1}{s}$ 倍して $\frac{r_2}{s}$ [Ω] とし，リアクタンス x_2 [Ω] はそのままとして，電動機を停止しているとき（$s=1$）に誘導される起電力によって流れる電流を示している。

(a)　すべり s で運転中の二次回路　　(b)　$s\dot{E}_2$, r_2, sx_2 を $\dot{E}_2$, $\frac{r_2}{s}$, x_2 に置き換えた二次回路

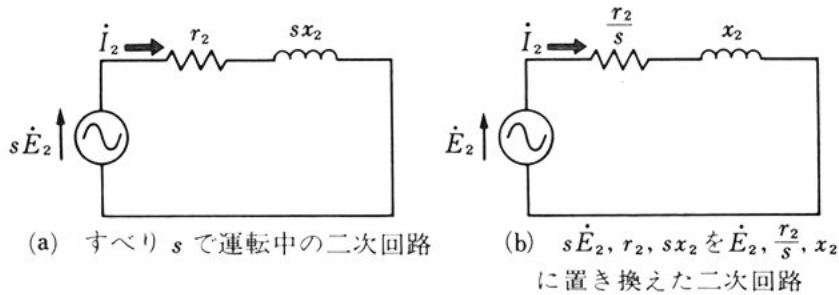



図8　二　次　電　流

この考え方で，誘導電動機も変圧器と同様に取り扱うことができる。

例題 2．回転子巻線（二次巻線）1相分の誘導起電力 E_2 が 127 [V]，抵抗 r_2 が 0.03 [Ω]，リアクタンス x_2 が 0.05 [Ω] であり，すべり s が 5 [%] で運転している誘導電動機がある。二次電流 I_2 [A] を求めよ。

解答　$I_2=\dfrac{sE_2}{\sqrt{r_2{}^2+(sx_2)^2}}=\dfrac{0.05\times127}{\sqrt{0.03^2+(0.05\times0.05)^2}}=211$ [A]

問 10． 誘導電動機が，停止しているときの二次電流を式で表せ。

（4）一　次　電　流

二次電流 I_2 [A] が流れると，I_2 [A] によって生じる回転磁界の回転速度は，回転子に対して sn_s [rpm] で，回転子の回転速度は，固定子に対して $(1-s)n_s$ [rpm] である。それで，I_2 [A] による回転磁界の回転速度は固定子に対して $sn_s+(1-s)n_s=n_s$ となり，一次側の回転磁界に作用する。そのため，一次側に生じる電圧が減少し，一次負荷電流 I_1' [A] が流れる。この関係は，図9のような変圧器の回路で表すことができる。そこで，一次巻線と二次巻線の巻数比*を α とすると，I_2 [A] と I_1' [A] との間には，次の関係がなりたつ。

* $\alpha=\dfrac{k_1w_1}{k_2w_2}$ となる。

$$I_1' = \frac{1}{\alpha} I_2 \qquad (7)$$

また，一次電流 $\dot{I}_1$ [A] は，一次巻線に流れる励磁電流 $\dot{I}_0$ [A] と，一次負荷電流 $\dot{I}_1'$ [A] との和になる。すなわち，$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_1'$ である。

4. 三相誘導電動機の等価回路

5

（1） 誘導電動機の回路

停止中の誘導電動機の回路は，変圧器 (68 ページの図 9) と同じように，表すことができる。

しかし，すべり s で運転中の誘導電動機では，すでに学んだように，二次誘導起電力が sE_2 [V]，二次リアクタンスが sx_2 [Ω]，二次

10 抵抗が r_2 [Ω] であるから，等価回路は，図 9 のように表される。

図において，二次側の入力を P_2 [W]，二次銅損を P_{c2} [W]，二次出力(機械出力)を P_0 [W] とすると，次の式がなりたつ。

$$P_2 = I_2{}^2 \frac{r_2}{s} = \frac{P_{c2}}{s} \qquad (8)$$

$$P_0 = P_2 - P_{c2} = P_2 - I_2{}^2 r_2 = P_2 - sP_2 = (1-s)P_2 \qquad (9)$$

15 式（8），（9）から，二次出力 P_0 [W] は，次の式で表される。

図 9 等価回路 (1)

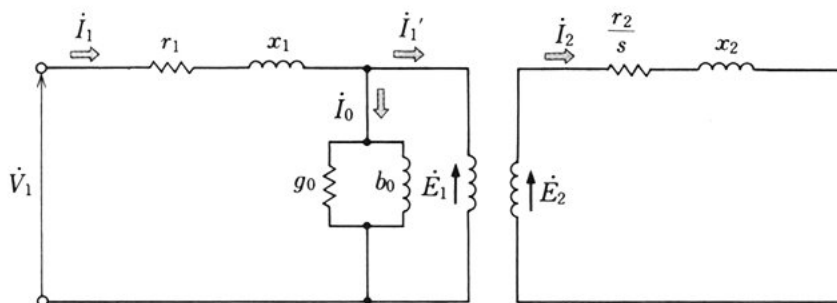
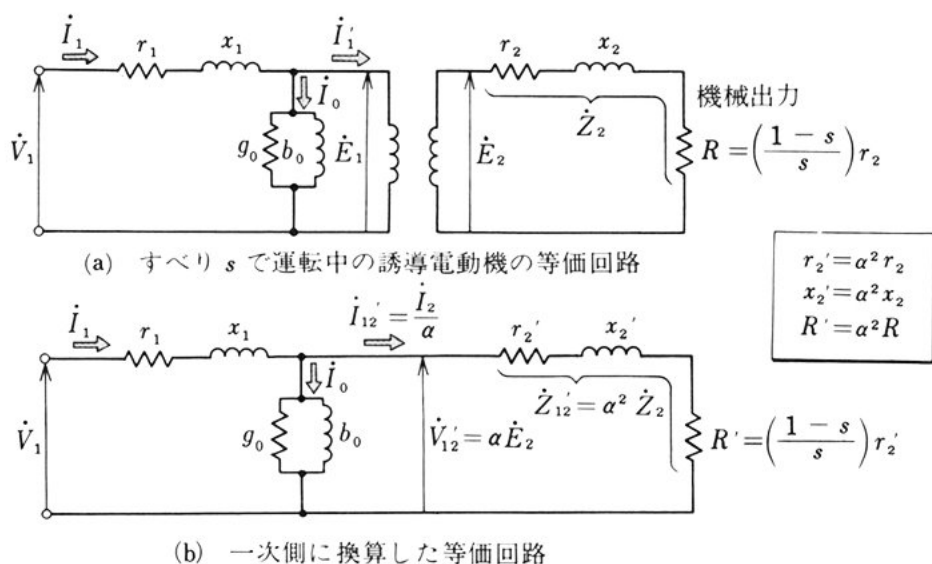
(a)　すべり s で運転中の誘導電動機の等価回路

(b)　一次側に換算した等価回路

図 10　等価回路 (2)

$$P_0=I_2^2\frac{r_2}{s}-I_2^2r_2=I_2^2r_2\left(\frac{1-s}{s}\right)=I_2^2R \qquad (10)$$

ここで，R [Ω] は機械的な負荷を表す等価抵抗であり，$\frac{r_2}{s}$ [Ω] は二次抵抗 r_2 [Ω] と R [Ω] の和である。それで，R [Ω] を用いて等価回路を図示すると，図 10(a) のように表される。

問 11． r_2 と R の和が，$\frac{r_2}{s}$ であることを確かめよ。　5

（2）　等　価　回　路

図 10(a) の二次側の諸量を一次側に換算すると，次のようになる。ただし，一次側に換算した二次側電圧・電流および，インピーダンスをそれぞれ V_{12}' [V]，I_{12}' [A]，Z_{12}' [Ω] とする。

$E_1=\alpha E_2$　　ゆえに，$V_{12}'=E_1=\alpha E_2$　　10

$I_1'=\frac{I_2}{\alpha}$　　ゆえに，$I_{12}'=I_1'=\frac{I_2}{\alpha}$

$$Z_{12}'=\frac{V_{12}'}{I_{12}'}=\frac{\alpha E_2}{\frac{I_2}{\alpha}}=\alpha^2 Z_2$$

以上のことから，図(a)は図(b)の回路で表すことができる。また，図11(a)は，励磁回路を電源側に移したものであるが，計算誤差は小さく，しかも計算が簡単になるので，ふつうこの**簡易等価回路**が用いられる。

(3) 簡易等価回路における諸量の計算

図11(a)の簡易等価回路において，誘導電動機の1相分の諸量を求めると，次のようになる。

一次負荷電流　$I_1' = \dfrac{V_1}{\sqrt{\left(r_1 + \dfrac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}}$ [A]

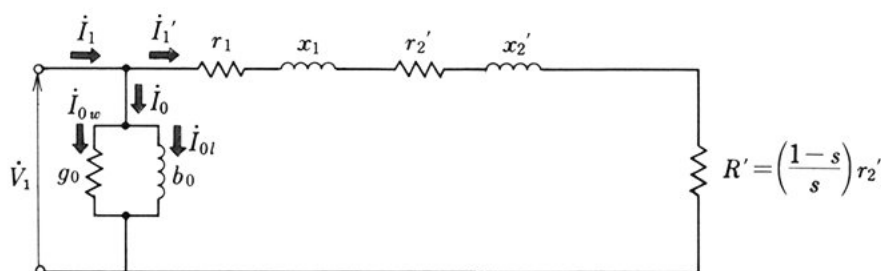
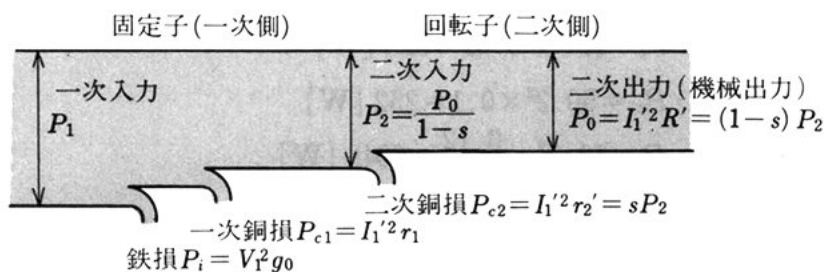
励磁電流　$I_0 = V_1\sqrt{g_0{}^2 + b_0{}^2}$ [A]

一次電流　$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_1'$ [A]

鉄　　損　$P_i = V_1 I_{0w} = V_1{}^2 g_0$ [W]

一次銅損　$P_{c1} = I_1'^2 r_1$ [W]

一次入力　$P_1 = P_i + P_{c1} + P_{c2} + P_0 = V_1 I_1 \cos\theta_1$ [W]

図 11　簡易等価回路と電力の流れ

(a)　簡易等価回路

(b)　電力の流れ

ただし，P_{c2} は二次銅損，P_0 は二次出力(機械出力)で，θ_1 は $\dot{V}_1$ と $\dot{I}_1$ の位相差である。

二次銅損　$P_{c2}=I_1'^2 r_2'=sP_2$ [W]

二次入力　$P_2=P_{c2}+P_0=\dfrac{P_0}{1-s}$

$$=I_1'^2\frac{r_2'}{s}=\frac{V_1^2\dfrac{r_2'}{s}}{\left(r_1+\dfrac{r_2'}{s}\right)^2+(x_1+x_2')^2}\ [\mathrm{W}]$$

二次出力　$P_0=I_1'^2R'=I_1'^2\left(\dfrac{1-s}{s}\right)r_2'=(1-s)P_2$ [W]

二次効率　$\eta_0=\dfrac{P_0}{P_2}=\dfrac{(1-s)P_2}{P_2}=1-s$

電動機の効率　$\eta=\dfrac{P_0}{P_1}$

例題 3.　図 11(a)の 1 相分の簡易等価回路で，$r_1=0.1$ [Ω]，$x_1=0.2$ [Ω]，$r_2'=0.12$ [Ω]，$x_2'=0.2$ [Ω]，$g_0-jb_0=0.02-j0.1$ [S]，$V_1=127$ [V]，$s=5$ [%] である。次の値を求めよ。

(1)　一次負荷電流　(2)　鉄　損　(3)　一次銅損

(4)　二次入力　(5)　二次銅損　(6)　二次出力

(7)　一次入力

解答　(1)　一次負荷電流

$$I_1'=\frac{127}{\sqrt{\left(0.1+\dfrac{0.12}{0.05}\right)^2+(0.2+0.2)^2}}=50.2\ [\mathrm{A}]$$

(2)　鉄　損　$P_i=127^2\times0.02=323$ [W]

(3)　一次銅損　$P_{c1}=50.2^2\times0.1=252$ [W]

(4)　二次入力　$P_2=50.2^2\times\dfrac{0.12}{0.05}=6048$ [W]

(5)　二次銅損　$P_{c2}=0.05\times6048=302$ [W]

(6)　二次出力　$P_0=(1-0.05)\times6048=5746$ [W]

(7)　一次入力　$P_1=323+252+302+5746=6623$ [W]

例題 **4.**　図 11(a)の簡易等価回路は1相分を表しているが，三相誘導電動機（Y 結線）の場合（3相分について），次の諸量はどうなるか。

(1)　鉄　損　　(2)　一次銅損　　(3)　一次入力
(4)　二次入力　　(5)　二次銅損　　(6)　二次出力
(7)　二次効率　　(8)　電動機の効率

解答　三相回路は，単相回路を三つ組み合わせたものであるから，鉄損・一次銅損・一次入力・二次入力・二次銅損・二次出力は，それぞれ1相分の値の3倍である。

次に，入力側からみて，端子電圧を V [V]，入力電流を I [A]，力率を $\cos\theta$ とすれば，Y 結線の場合，$V=\sqrt{3}\ V_1$ [V]，$I=I_1$ [A] となる。

三相一次入力は，端子電圧 V [V]，入力電流 I [A] を用いて，次の式で表すことができる。

$$P=3P_1=3\frac{V}{\sqrt{3}}I\cos\theta=\sqrt{3}\ VI\cos\theta$$

二次効率，電動機の効率は，1相分の場合と同じである。

問 12.　端子電圧 V_1 が 200 [V]，一次入力 P_1 が 9 [kW]，力率 $\cos\theta$ が 83 [%] の三相誘導電動機がある。全負荷電流はいくらか。

問 13.　60 [Hz]，6極の誘導電動機を全負荷で運転しているとき，すべり s が 5 [%]，二次側損失 P_{c2} が 800 [W] であったという。このときの誘導電動機の回転速度 n [rpm]，出力 P [kW]，すべり周波数 sf [Hz] を求めよ。

問 14.　二次入力 P_2 が 11.5 [kW]，電圧 V_1 が 200 [V]，周波数 f が 50 [Hz]，極数 p が 4，回転速度 n が 1440 [rpm] の三相誘導電動機がある。次の値を求めよ。

(1)　同期速度　(2)　全負荷時のすべり　(3)　二次効率

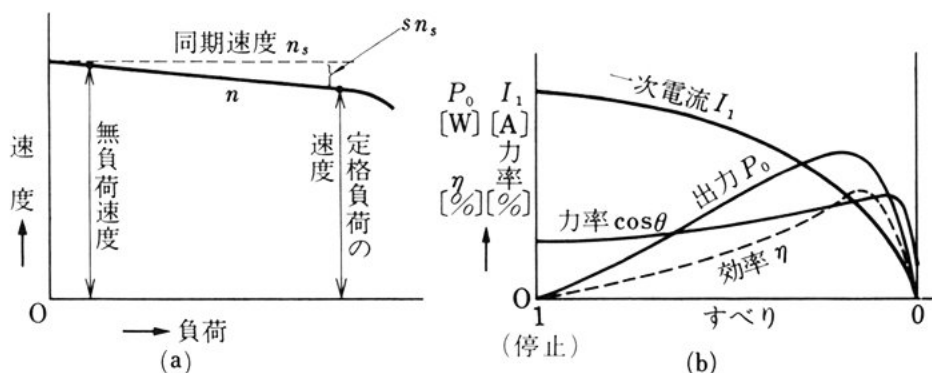
(4)　二次銅損

5.　三相誘導電動機の特性

(1)　速　度　特　性

誘導電動機の回転速度は，図12(a)に示すように，負荷によって変化するが，無負荷時と全負荷時の回転速度の差は非常に小さいので，誘導電動機は，直流分巻電動機と同じように，定速度電動機である。

また，回転速度が変わり，すべりが変わると，二次電流 I_2 [A]，一次電流 I_1 [A]，二次出力 P_0 [W]，効率 η [%] なども変化する。図12(b)は，一次電圧を一定に保ち，回転速度 n [rpm] の代わりにすべり s をとり，すべり s に対する一次電流 I_1 [A]，二次出力 P_0 [W]，力率 $\cos\theta$，効率 η [%] の変化のようすを示したもので，これを**速度特性曲線**という。

図 12　速度特性曲線

(2) トルク特性

トルク　電動機のトルクが T [N•m], 角速度が ω [rad/s], 回転速度が n [rpm] とすれば，二次出力 P_0 [W] は次の式で表される。

$$P_0=\omega T=2\pi\frac{n}{60}T \tag{11}$$

5 ゆえに，

$$T=\frac{60}{2\pi}\cdot\frac{P_0}{n} \tag{12}$$

式 (11) に，$P_0=P_2(1-s)$ および $n=n_s(1-s)$ を代入すると，二次入力 P_2 [W] は，次の式で表される。

$$P_2=2\pi\frac{n_s}{60}T \tag{13}$$

式 (11) で示す出力は，トルク T [N•m] を発生して回転速度 n
10 [rpm] で回転しているときの電力を表している。これに対して，式 (13) の二次入力 P_2 [W] は，同じトルクのもとで，同期速度で回転しているときの出力電力を表している。これを**同期ワット**という。誘導電動機のトルク T [N•m] は，同期ワット（二次入力）P_2 [W] に比例しているので，トルクを表すとき，トルク T [N•m] の代
15 わりに，P_2 [W] すなわち同期ワットで表すことが多い。

すべりとトルクの関係　式 (13) から，トルク T [N•m] は，次の式で表される。

$$T=\frac{60}{2\pi n_s}P_2=KP_2 \tag{14}$$

また，式 (14) に，132 ページの二次入力の式を代入すると，式 (15)
20 が得られる。

$$T=K\frac{V_1^2\dfrac{r_2'}{s}}{\left(r_1+\dfrac{r_2'}{s}\right)^2+(x_1+x_2')^2} \tag{15}$$

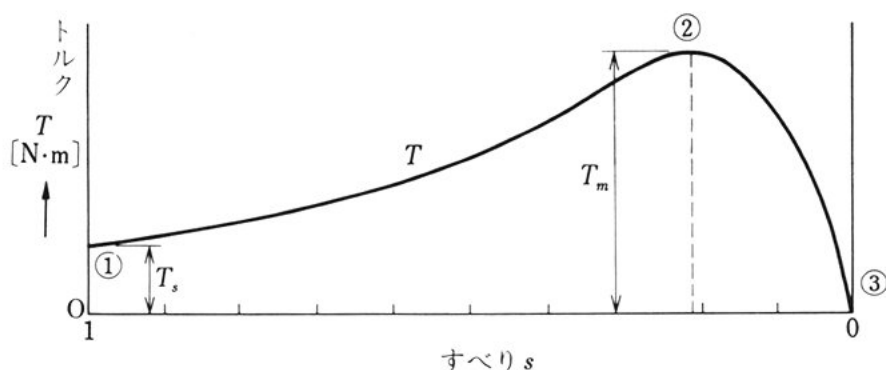



図 13　トルク－速度曲線

したがって，誘導電動機のトルク T [N•m] は，すべり s が一定であれば，一次電圧 V_1 [V] の2乗に比例することがわかる。

一般に，一定電圧で運転中の誘導電動機において，r_1 [Ω]，r_2' [Ω]，x_1 [Ω]，x_2' [Ω] は定数であり，負荷の影響を受けるのはすべり s である。この場合，すべり s とトルク T [N•m] の関係は，図13に示す曲線になる。これを**トルク－速度曲線**という。

図13において，$s=1$ のときのトルク T_s [N•m] は，**始動トルク**とよばれ，式 (15) から $T_s=K\dfrac{V_1{}^2r_2'}{(r_1+r_2')^2+(x_1+x_2')^2}$ で表される。始動トルク T_s [N•m] は小さな値である。また，点①から最大トルク T_m [N•m] を生じる点②までは，トルク T [N•m] は，すべり s にほぼ反比例して増加し，点②を過ぎると，すべり s にほぼ比例して減少し，$s=0$ の点③では0になる。なお，最大トルク T_m [N•m] は**停動トルク**ともよばれる。

停動トルク　式 (15) を変形すると，式 (16) になる。

$$T=K\frac{V_1{}^2r_2'}{s\{r_1{}^2+(x_1+x_2')^2\}+\dfrac{r_2'^2}{s}+2r_1r_2'} \qquad (16)$$

この式において，s の値が変われば，それに伴って T が変わる。トルク T が最大値 T_m [N•m] になるのは，s がどのような値のと

きかを考える。この場合，式 (16) の分子および分母の第3項は一定値であるから，分母の第1項と第2項について考える。ところで，第1項と第2項の積は一定であるから，それらが等しいときに，分母は最小となり，トルク T は最大値 T_m [N・m] となる。このときのすべり s は次の式で表される。

$$s=\frac{r_2'}{\sqrt{r_1{}^2+(x_1+x_2')^2}} \qquad (17)$$

例題 5． 極数 p が 4，周波数 f が 60 [Hz] の三相誘導電動機が，すべり s が 5 [%]，トルク T が 115 [N・m] で回転している。このときの機械出力 P_0 [kW] と同期ワット P_2 [kW] を求めよ。

解答 この電動機の同期速度 n_s [rpm] および回転速度 n [rpm] は，

$$n_s=\frac{120f}{p}=\frac{120\times 60}{4}=1800 \text{ [rpm]}$$

$$n=(1-s)\,n_s=(1-0.05)\times 1800=1710 \text{ [rpm]}$$

となる。機械出力（二次出力）P_0 は，式 (11) から，

$$P_0=2\pi\frac{n}{60}T=2\pi\times\frac{1710}{60}\times 115=20.6\times 10^3 \text{ [W]} =20.6 \text{ [kW]}$$

となり，同期ワット（二次入力）P_2 は，式 (13) から，

$$P_2=2\pi\frac{n_s}{60}T=2\pi\times\frac{1800}{60}\times 115=21.7\times 10^3 \text{ [W]} =21.7 \text{ [kW]}$$

となる。

問 15． 誘導電動機の一次電圧を $\frac{1}{2}$ にすると，トルクは何倍になるか。

問 16． 二次入力 P_2 が 16 [kW]，回転速度 n が 1140 [rpm] で運転している，周波数 f が 60 [Hz] の三相巻線形誘導電動機のトルク T [N・m]，および機械出力 P_0 [kW] を求めよ。ただし，すべり周波数 sf_1 は 3 [Hz] である。

（3） 比 例 推 移

式 (15) において，V_1 [V]，r_1 [Ω]，x_1 [Ω]，x_2' [Ω] が一定であ

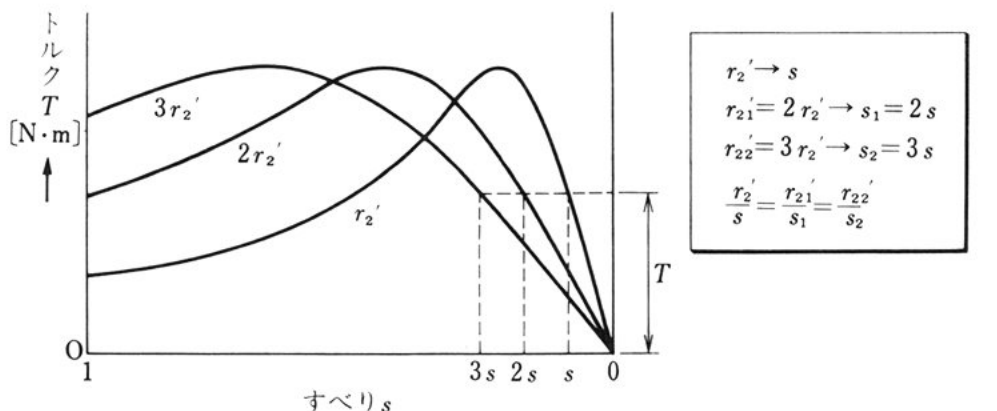
り，$\frac{r_2'}{s}$［Ω］の値が変わらなければ，T［N・m］は変わらない。このことは，r_2'［Ω］を2倍にすれば，sが2倍になり，r_2'［Ω］を3倍にすれば，sは3倍になることを意味する。

図14は，r_2'［Ω］の値によって，トルク－速度曲線がどのように変化するかを示したものである。r_2'が大きくなると，この曲線はすべりsの大きな方へ移動する。どのTについても，sの値はつねにr_2'に比例して推移するので，この曲線の推移のしかたを**比例推移**という。この性質を利用すると，r_2'を適当に選ぶことによって，始動時に最大トルクが得られる。

電流・力率などもトルクと同様に，二次回路の抵抗r_2'の大きさに従って比例推移する。

例題 6．周波数fが50［Hz］，極数pが4，全負荷時の回転速度nが1450［rpm］の巻線形三相誘導電動機がある。回転速度nを1000［rpm］にして，全負荷トルクで運転するには，二次回路の各相に何倍の抵抗を挿入すればよいか。

解答　同期速度　$n_s=\frac{120f}{p}=\frac{120\times 50}{4}=1500$［rpm］

図 14　トルクの比例推移

1450 [rpm] のときのすべり　$s_1=\frac{1500-1450}{1500}=0.0333$

1000 [rpm] のときのすべり　$s_2=\frac{1500-1000}{1500}=0.333$

二次回路の各相の抵抗を r_2 [Ω]，外部に挿入する抵抗を R [Ω] とすると，比例推移の考えから，

5

$$\frac{r_2}{s_1}=\frac{r_2+R}{s_2} \qquad \frac{r_2}{0.0333}=\frac{r_2+R}{0.333}$$

ゆえに，　$R=\frac{0.333-0.0333}{0.0333}r_2=9r_2$

よって，r_2 [Ω] の 9 倍の抵抗を各相に挿入すればよい。

問 17．すべり s が 10 [%] で最大トルク T_m [N·m] を発生する誘導電動機がある。いま，二次抵抗をもとの 3 倍にした。すべり s が何パーセントのときに，最大トルク T_m [N·m] が発生するか。

10

6．三相誘導電動機の運転

(1) 始　動　法

始動時における三相誘導電動機は，二次側を短絡した変圧器と同じと考えられるから，一次側に定格電圧を加えると，大きな始動電流が流れる。とくに容量が大きな場合は，電動機が接続されている電源に対して，電圧降下などのわるい影響を与える。したがって，始動電流を制限するために，いろいろな始動法がある。

15

全電圧始動法　3.7 [kW] 以下の小容量の誘導電動機では，配電線に対する影響も少ないので，直接定格電圧を加えて始動する。なお，始動電流は，定格電流の 500～700 [%] 程度である。

20

Y－Δ 始動法　容量 11 [kW] 程度までのかご形三相誘導電動機に用いられる方法で，図 15 (a) に示すように接続する。始動する

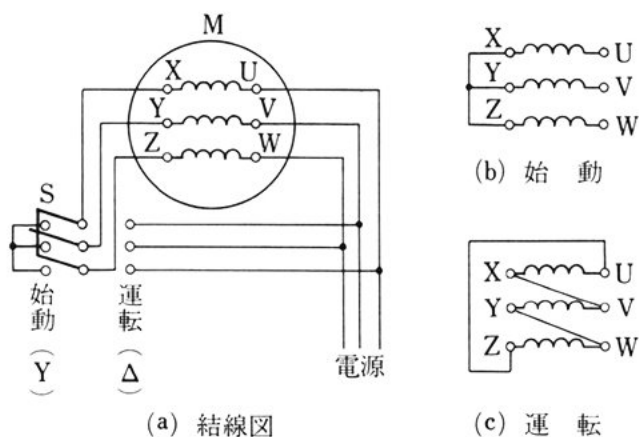



図 15　Y－△始動法

ときには切換スイッチSを始動側に閉じて，一次巻線をY結線にする。図(b)は，このときの内部接続を示したものである。次に，回転速度が増大したとき，Sを運転側に閉じると，一次巻線は，図(c)に示すように△結線となる。この方法によると，始動のとき，各巻線の電圧は定格電圧の $\frac{1}{\sqrt{3}}$ となるため，線電流は全電圧始動のときの $\frac{1}{\sqrt{3}}\times\frac{1}{\sqrt{3}}$，すなわち $\frac{1}{3}$ となり，始動電流は定格電流の 150〜200［%］ぐらいに制限できる。しかし，トルクは電圧の2乗に比例することから，始動トルクも $\frac{1}{3}$ に減少する。

始動補償器法　容量15［kW］以上のかご形三相誘導電動機に用いられる方法で，図16に示す始動補償器として三相単巻変圧器を用いる。変圧器のタップにより，始動時に低電圧を加え，回転速度が増したら，運転側に移して全電圧を加え，始

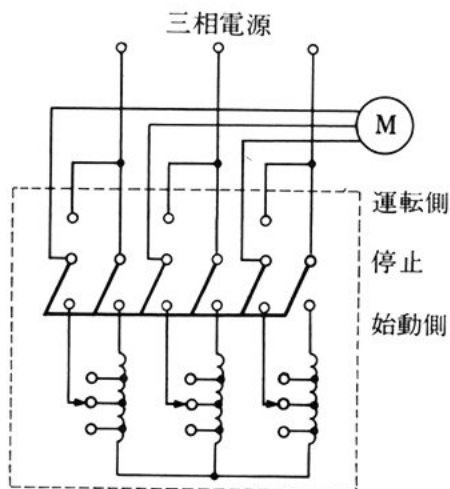



図 16　始動補償器

動補償器を電動機の回路から切り離す。図 16 はその例である。

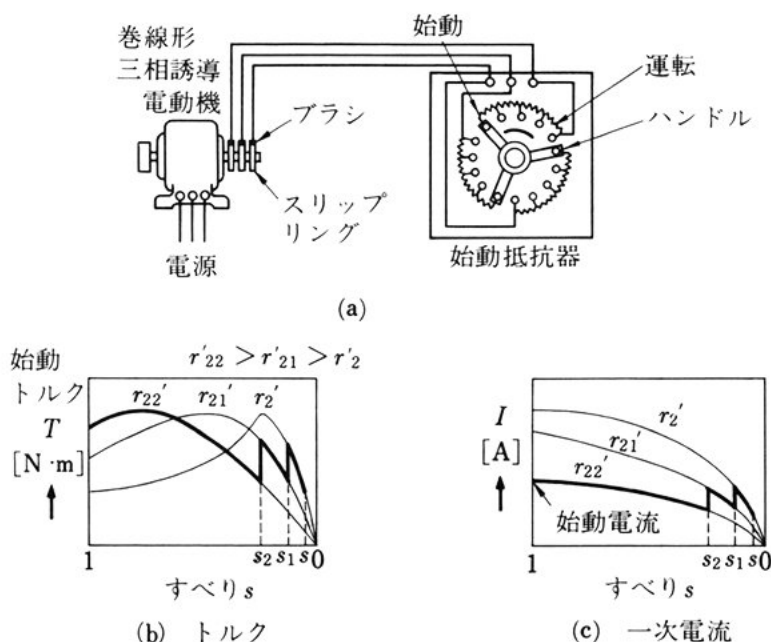
巻線形三相誘導電動機の始動法　巻線形三相誘導電動機では，図 17 (a) に示すように，スリップリングを通して，二次側に三相可変抵抗器を接続して始動する。この方法では，図 17 (b)，(c) に示すように，始動トルク T [N･m]を大きくし，小さな始動電流 I [A] で始動することができる。この場合の始動電流は，定格電流の 110～150 [%] ぐらいに制限している。

問 18． 定格電圧 200 [V] で始動すると，始動電流が 200 [A] となる三相誘導電動機がある。Y - △ 始動法を用いると始動電流はいくらになるか。

問 19． 始動補償器を用いて定格の $\frac{2}{3}$ 倍の電圧で始動すると，三相誘導電動機の始動電流・始動トルクはそれぞれ何倍になるか。

問 20． 巻線形三相誘導電動機の二次抵抗を接続すると，トルクおよび始動電流を制御することができる。なぜか。

図 17 巻線形誘導電動機の始動

(b) トルク　　(c) 一次電流

(2) 速度制御法

誘導電動機の回転速度は，$n=n_s(1-s)=\frac{120f}{p}(1-s)$ で表されるから，すべり s，極数 p または，周波数 f を変えれば，回転速度を変えることができる。したがって，誘導電動機の速度制御には，次に示す方法がある。

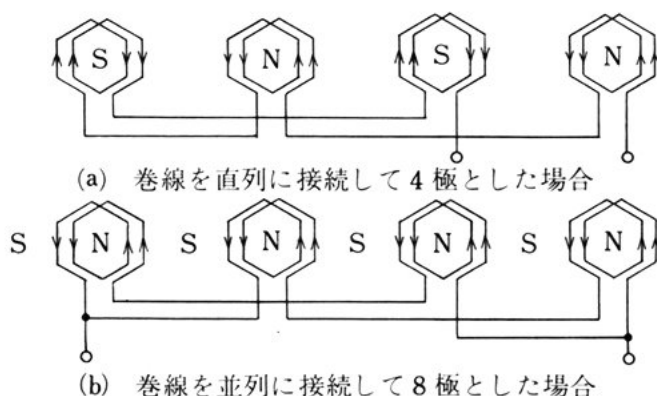
巻線形誘導電動機の二次抵抗による制御　これは，トルクの比例推移を利用してすべりを変えるもので，スリップリングを通して接続した抵抗を加減することによって速度制御ができる。この方法は，制御用の抵抗器を始動用に使える利点もあるが，抵抗器の損失が大きいので，効率がわるい。

極数変換による制御　かご形誘導電動機で，図18に示すように，固定子巻線の接続を図(a)から図(b)に変えて速度制御する。また，同一鉄心に異なった極数の巻線をおのおの独立に巻いて，速度制御する方法がある。この方法は，能率はよいが，速度の調整が段階的になる。

周波数による制御　可変周波数電源を用いて，電動機に加わる周波数を変えて速度制御を行う。周波数の可変装置としては，次のものがある。

図 18　極数変換(接続変換)**による速度制御**

(a)　巻線を直列に接続して4極とした場合

(b)　巻線を並列に接続して8極とした場合

可変電圧可変周波数(VVVF)インバータ*　電源周波数を半導体整流器によっていったん直流に変換し，その直流をふたたびインバータによって可変周波数交流に変換する方法である。また，適正なトルクを得るためには，電圧と周波数の比 $\frac{V}{f}$ を一定に保たなければならないので，周波数だけでなく電圧も変えることができる。周波数を変えることができる範囲は，数[Hz]から50または60[Hz]程度のものが多く，広範囲にしかも連続的に速度制御することができる。容量は1〜2000[kVA]のものがある。

サイクロコンバータ**　交流電源からサイリスタのスイッチング特性を利用して，直接周波数の異なる交流を得る方法である。周波数の変えられる範囲は，電源周波数の $\frac{1}{2}$〜$\frac{1}{3}$ 程度で，高速運転が得られない欠点はあるが，低・中速の中・大容量機に用いられる。

一次電圧による制御

式(15)からわかるように，誘導電動機のトルクは電圧の2乗に比例する。図19は，一次電圧を変えるときのトルク特性曲線で，電圧を V_1, V_2, V_3 と変えることにより，電動機のすべりを s_1, s_2, s_3 と変えることができる。

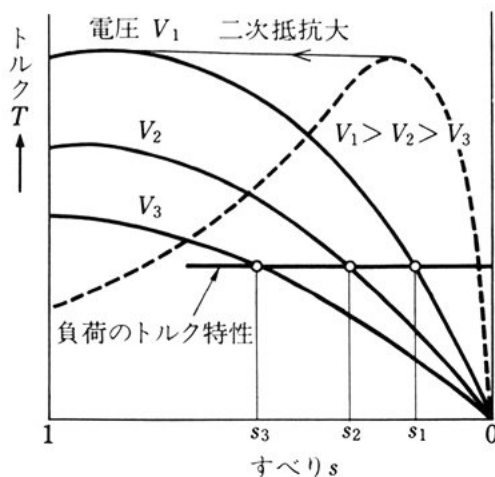



図 19　一次電圧制御法

すべりの変わる範囲を広くするには，二次抵抗 r_2 [Ω] の値を大きく設計して，トルク特性曲線の傾きをゆるやかにする必要がある。こ

*, **　241ページ参照。

のため，二次抵抗による損失が大きく，効率がよくない。小容量機に用いられる。

(3) 逆 転

誘導電動機の回転の向きは，負荷の反対側からみて時計回りを標準としている。しかし，電動機の負荷の性質などから，逆回転させて使用することがある。電動機の回転の向きを逆にするには，3線のうち，いずれかの2線を入れ換えればよい。こうすれば，一次巻線に流れる三相交流の相順が逆になり，回転磁界の向きが逆になるため，電動機は逆転する。

7. 円 線 図

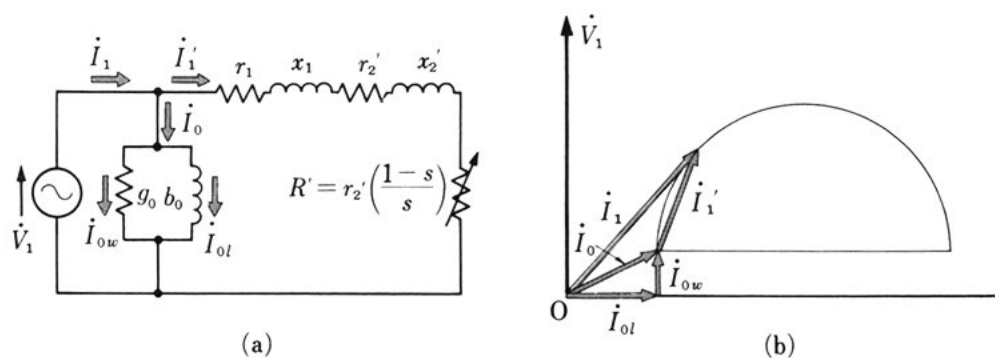
(1) ベクトル軌跡

図20(a)の簡易等価回路において，励磁電流 $\dot{I}_0$ [A] は，供給電圧 $\dot{V}_1$ [V] と同相の電流 $\dot{I}_{0w}$ [A] と，位相が $\frac{\pi}{2}$ [rad] 遅れる電流 $\dot{I}_{0l}$ [A] との和であり，一次電流 $\dot{I}_1$ [A] は，励磁電流 $\dot{I}_0$ [A] と一次負荷電流 $\dot{I}_1'$ [A] との和である。これらのベクトル図を図(b)に示す。

図(a)において，誘導電動機の負荷が大きくなり，s が大きくなる

図 20 等価回路とベクトル軌跡

(a)

(b)

と，R' [Ω] は小さくなり，$\dot{I}_1'$ [A] が大きくなる。それに従って，$\dot{I}_1$ [A] のベクトルの先端の軌跡は，図(b)に示すように半円をかく。この線図を**円線図**という。このように，簡易等価回路をもとにしてかいた円線図をハイランド円線図という。

5　三相誘導電動機の特性は，すでに学んだように等価回路から導き出すことができる。しかし実際には，簡単な試験から，等価回路を基礎とした円線図をかいて，誘導電動機の特性を求めることが多い。円線図を用いると，誘導電動機に実際に負荷をかけないで，任意の負荷状態における特性を知ることができる。

10　**（2） 円線図のかき方**

円線図をかくには，次の三つの試験が必要である*。

無負荷試験　三相誘導電動機を定格電圧 V_n [V] で無負荷運転し，そのときの無負荷電流 I_0 [A]，無負荷入力 P_i [W] を測定し，I_0 [A] の有効分 I_{0w} [A]，無効分 I_{0l} [A] を次の式により計算する。

15
$$I_{0w}=\frac{P_i}{\sqrt{3}\,V_n}\qquad I_{0l}=\sqrt{I_0{}^2-I_{0w}{}^2}$$

拘束試験　回転子を回転しないように拘束して，一次巻線に一次定格電流 I_n [A] を流すときの一次電圧 V_s' [V]，一次入力 P_s' [W] を測定し，次の式により定格電圧 V_n [V] を加えたときの拘束電流 I_s [A]，一次入力 P_s [W]，I_s [A] の有効分 I_{s1} [A]，無効分

20　I_{s2} [A] を次の式により計算する。

$$\left.\begin{array}{llll}\text{拘束電流} & I_s=I_n\dfrac{V_n}{V_s'} & \text{一次入力} & P_s=P_s'\left(\dfrac{V_n}{V_s'}\right)^2\\[2ex] I_s\text{の有効分} & I_{s1}=\dfrac{P_s}{\sqrt{3}\,V_n} & I_s\text{の無効分} & I_{s2}=\sqrt{I_s{}^2-I_{s1}^2}\end{array}\right\}$$

* これらの試験は，JIS C 4207 三相誘導電動機の特性算定方法に示されている。

抵抗測定　測定温度 t [°C] において，一次巻線の各端子間で測定した抵抗の平均値を R [Ω] とし，この値から次の式によって**基準巻線温度***における一次巻線の1相分の抵抗 r_1 [Ω] を計算する。

$$r_1=\frac{R}{2}\cdot\frac{234.5+(\text{基準巻線温度})}{234.5+t}$$

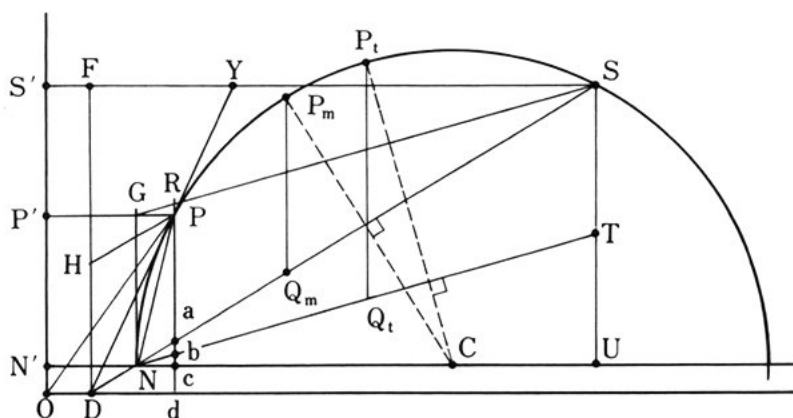
以上，三つの試験で計算した値を用い，円の直径が20 [cm] 以上となるように，適当な尺度で，図21に示すように作図する。

1) 原点Oより垂線を立て，その上に $\overline{\mathrm{ON'}}=I_{0w}$ および $\overline{\mathrm{OS'}}=I_{s1}$ をとる。N′およびS′からそれぞれ水平線を引き，その上に $\overline{\mathrm{N'N}}=I_{0l}$，$\overline{\mathrm{S'S}}=I_{s2}$ をとり，NおよびSを定める。

2) Sから $\overline{\mathrm{N'N}}$ の延長上に垂線を下ろし，その交点をUとする。

3) N，Sを結び，$\overline{\mathrm{NS}}$ の垂直二等分線と $\overline{\mathrm{NU}}$ との交点をCとし，Cを中心とする半径 $\overline{\mathrm{CN}}$ の半円をかく。

4) $\overline{\mathrm{NS}}=I_s'$ の大きさを測り，次の式によって点Tを定めN，Tを結ぶ。

図21 円 線 図

* 絶縁の種類が，A，B，E種絶縁では75 [°C]，F，H種絶縁では115 [°C] である。

$$\overline{\mathrm{TU}}=\frac{\sqrt{3}\,r_1 I_s'^2}{V_n}$$

5) $\overline{\mathrm{SN}}$ を延長し，原点Oから引いた水平線との交点をDとし，Dから垂線を立て，$\overline{\mathrm{SS'}}$ との交点をFとする。

6) Nから垂線を立て，Sを通り $\overline{\mathrm{NT}}$ に平行に引いた線との交点をGとする。

7) 中心Cから，$\overline{\mathrm{NS}}$ および $\overline{\mathrm{NT}}$ に垂線を立て円弧との交点をそれぞれ $\mathrm{P_m}$, $\mathrm{P_t}$ とする。$\mathrm{P_m}$ および $\mathrm{P_t}$ から垂線 $\overline{\mathrm{P_mQ_m}}$ および $\overline{\mathrm{P_tQ_t}}$ を下ろす。$\mathrm{Q_m}$ は $\overline{\mathrm{NS}}$ 上，$\mathrm{Q_t}$ は $\overline{\mathrm{NT}}$ 上の点である。

（3） 特性の求め方

こうしてかいた円線図より，与えられた電動機の任意の出力 P [kW] における特性を次のようにして求める。

1) $\overline{\mathrm{DH}}=\dfrac{1000P}{\sqrt{3}\,V_n}$ になるように点Hを定め，Hから $\overline{\mathrm{DS}}$ に平行線を引き，円弧との交点をPとする。

2) Pより垂線を下ろし，$\overline{\mathrm{NS}}$, $\overline{\mathrm{NT}}$, $\overline{\mathrm{NU}}$ およびOから引いた水平線との交点をそれぞれ a, b, c, d とする。

3) Pから水平線を引き，$\overline{\mathrm{OS'}}$ との交点をP′とする。

4) PをO, D, Nに結び，$\overline{\mathrm{DP}}$ の延長線と $\overline{\mathrm{SS'}}$ との交点をY，$\overline{\mathrm{NP}}$ の延長線と $\overline{\mathrm{GS}}$ との交点をRとする。

以上の作図から，次のように特性を求める。

一次電流　$I_1=\overline{\mathrm{OP}}$ [A]

一次負荷電流　$I'_1=\overline{\mathrm{NP}}$ [A]

力率　$\cos\theta=\dfrac{\overline{\mathrm{OP'}}}{\overline{\mathrm{OP}}}\times 100$ [%]

一次入力　$P_1=\sqrt{3}\,V_n\overline{\mathrm{Pd}}$ [W]　　鉄損　$P_i=\sqrt{3}\,V_n\overline{\mathrm{cd}}$ [W]

一次銅損　$P_{c1}=\sqrt{3}\,V_n\overline{\mathrm{bc}}$ [W]　　二次銅損　$P_{c2}=\sqrt{3}\,V_n\overline{\mathrm{ab}}$ [W]

二次入力（同期ワット）　$P_2=\sqrt{3}\,V_n\overline{\mathrm{Pb}}$ [W]

二次出力（機械出力）　$P_0=\sqrt{3}\,V_n\overline{\mathrm{Pa}}$ [W]

すべり　$s=\frac{\overline{\mathrm{ab}}}{\overline{\mathrm{Pb}}}\times 100=\frac{\overline{\mathrm{GR}}}{\overline{\mathrm{GS}}}\times 100$ [%]

効率　$\eta=\frac{\overline{\mathrm{Pa}}}{\overline{\mathrm{Pd}}}\times 100=\frac{\overline{\mathrm{YS}}}{\overline{\mathrm{FS}}}\times 100$ [%]

最大出力　$P_m=\sqrt{3}\,V_n\overline{\mathrm{P_mQ_m}}$ [W],

停動トルク　$T_m=\frac{\sqrt{3}\,V_n}{2\pi\frac{n}{60}}\cdot\overline{\mathrm{P_tQ_t}}$ [N・m]

点P以外についても，任意の出力に相当する点を円周上にとれば，出力の変化に対する特性の変化を知ることができる。

問 21.　周波数 f が 60 [Hz]，極数 p が 4，定格電圧 V_n が 200 [V] の三相誘導電動機の円線図において，$\overline{\mathrm{Pa}}=102$ [mm]，$\overline{\mathrm{ab}}=4.2$ [mm]，$\overline{\mathrm{bc}}=5.5$ [mm]，$\overline{\mathrm{cd}}=6.3$ [mm]，$\overline{\mathrm{OP}}=132$ [mm] であるとする。このときの負荷電流 I_1 [A]，出力 P_0 [W]，効率 η，力率 $\cos\theta$，すべり s，トルク T [N・m] の値を求めよ。ただし，電流尺度は 1 [A]=10 [mm] とする。

問 22.　図22の円線図において，Cから $\overline{\mathrm{NS}}$，$\overline{\mathrm{NT}}$ に垂線を引き，円周と交わる点 $\mathrm{P_m}$，$\mathrm{T_m}$ を求めると，$\overline{\mathrm{P_mP_m'}}$ は最大出力，$\overline{\mathrm{T_mT_m'}}$ は最大トルクになることを確かめよ。

(a)
PP'は機械出力に比例

(b)
$\mathrm{T_1T_1'}$は二次入力に比例

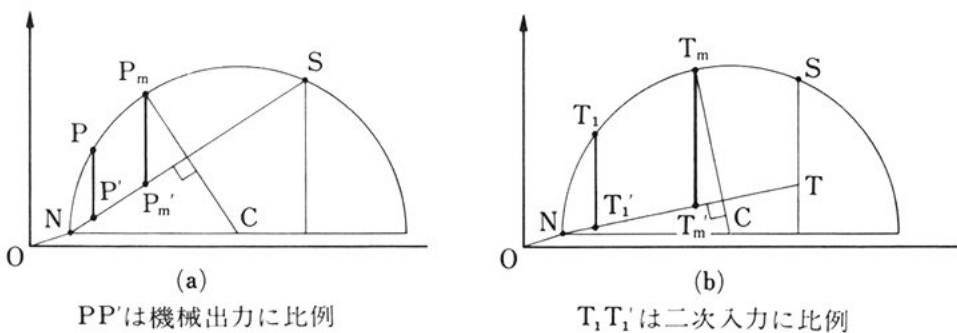



図 22

問　題

1. 図 23 において，①〜⑥ は，Ⓐ〜Ⓕ のどれに当てはまるか。

Ⓐ 端子箱

Ⓑ 固定子巻線

Ⓒ 軸　受

Ⓓ 固定子枠

Ⓔ 固定子鉄心

Ⓕ 回転子

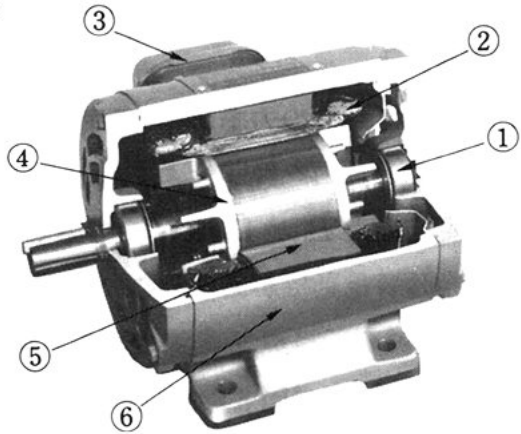



図 23

2. かご形誘導電動機と巻線形誘導電動機の構造上の相違点を挙げ，簡単に説明せよ。

3. 極数 p が 6, 周波数 f が 50 [Hz] の三相誘導電動機がある。全負荷時の回転速度 n が 960 [rpm] である。この電動機のすべり s とすべり周波数 sf [Hz] を求めよ。

4. 一次電圧 V_s' が 200 [V]，周波数 f が 60 [Hz]，極数 p が 4，二次出力 P_0 が 22 [kW] の三相誘導電動機があり，全負荷時の回転速度 n が 1728 [rpm] であるという。次の値を求めよ。

(1) すべり　(2) 二次入力　(3) 二次効率　(4) 同期ワット

5. 図 24 は，三相誘導電動機の一次巻線を示す。図 (a) は Y 結線，図 (b)

(a)

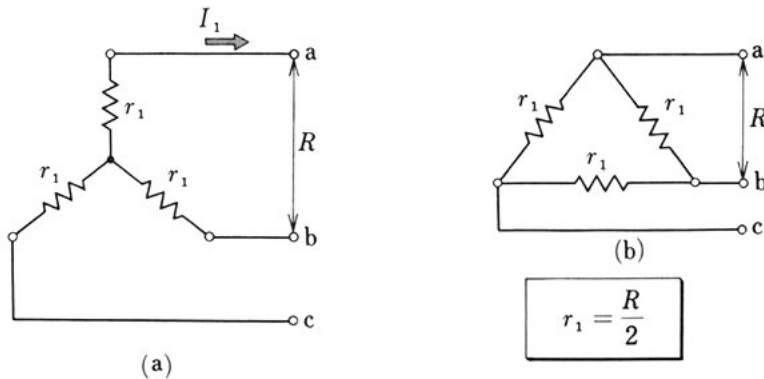
(b)

$$r_1 = \frac{R}{2}$$

図 24

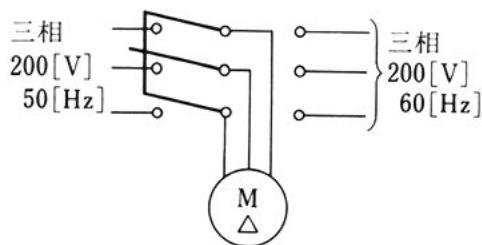
は △ 結線である。1相分の抵抗を r_1 [Ω]，2線間で測定した抵抗を R [Ω] とするとき，図(a)では $r_1=\frac{R}{2}$，図(b)では $r_1=\frac{3R}{2}$ になるが，特性を求める場合には，結線に関係なく，$r_1=\frac{R}{2}$ としてよい。その理由を考えよ。

6．誘導電動機の力率は，無負荷時にわるく，負荷が増すに従ってよくなる。その理由を説明せよ。

7．定格出力 P_0 が 15 [kW]，力率 $\cos\theta$ が 85 [%]，効率 η が 86 [%] の三相誘導電動機がある。この電動機の入力および損失はいくらか。また，電源変圧器がV結線であるとすれば，1台の変圧器の容量はいくらか。(99ページ図8参照)。

8．定格出力 P_0 が 11 [kW]，極数 p が 6 の三相誘導電動機がある。次の問いに答えよ。ただし，すべり s は 4 [%] である。

(1) 図25に示す周波数 f が 50 [Hz] および 60 [Hz] の電源で運転したときの，それぞれの回転速度 n [rpm] はいくらか。

図 25

(2) 周波数 f が 50 [Hz] および 60 [Hz] の場合の二次銅損 P_{c2} [W] は，それぞれいくらか。

(3) この電動機に適する始動法は何か。その理由を述べよ。

9．定格電圧 V_n が 200 [V]，定格出力 P_0 が 2.2 [kW]，極数 p が 4，周波数 f が 50 [Hz] の三相かご形誘導電動機を試験し，次の結果を得た。

無負荷試験	$I_0=4.1$ [A]	$P_i=135$ [W]	
拘束試験	$I_n=9$ [A]	$V_s'=43$ [V]	$P_s'=340$ [W]
抵抗測定	$R=0.77$ [Ω] ($t=15$ [°C]，E種絶縁)		

この結果から円線図をかき，定格出力における特性を求めよ。

2 各種誘導機

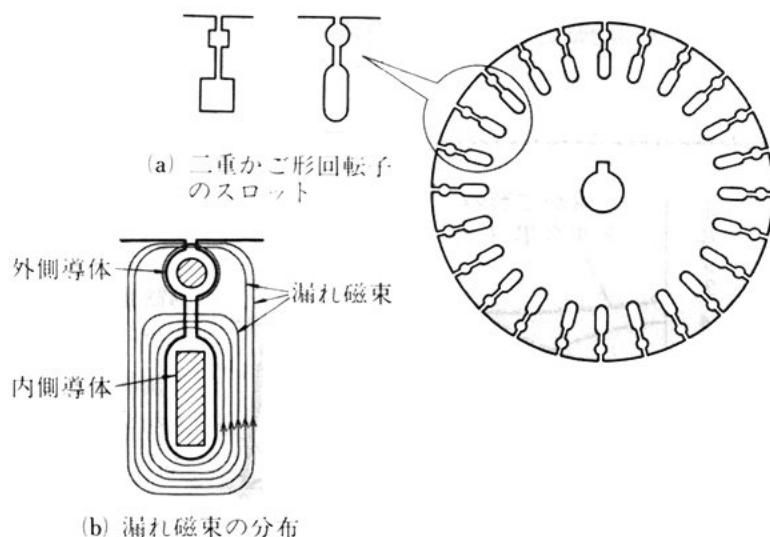
この節の目標　これまでに学んできた三相誘導電動機は，各種電動機の中で，工場その他一般事業場などで最も多く用いられている。容量 11 [kW] 以下の小形誘導電動機には，構造が簡単で，価格も安く，取り扱いが便利なかご形誘導電動機が一般に用いられている。ここでは，各種誘導電動機として特殊かご形誘導電動機，また電灯線を利用できる小動力用の単相誘導電動機，さらに，誘導電圧調整器について調べる。

1. 特殊かご形誘導電動機

かご形誘導電動機の欠点は，始動電流が大きいわりに始動トルクが小さいことである。この始動特性を改良したものに，二重かご形誘導電動機や深みぞかご形誘導電動機がある。

図 1　二重かご形回転子

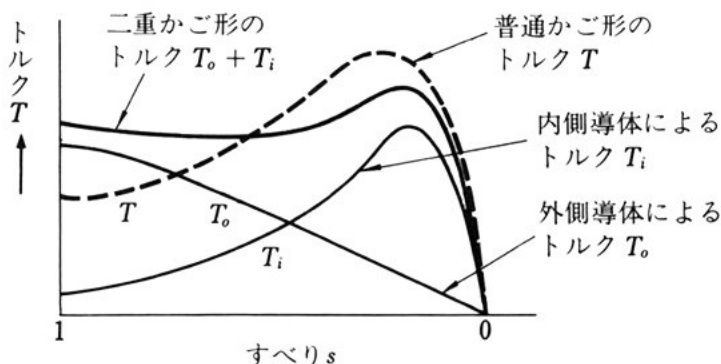
(a) 二重かご形回転子のスロット

(b) 漏れ磁束の分布

（1）　二重かご形誘導電動機

二重かご形誘導電動機は，図1(a)に示すように，回転子に内外二重のスロットを設け，それぞれに導体を埋めたものである。外側の導体は，内側の導体に比べて抵抗を大きくしてある。また，内側の導体は，鉄心に深く埋めてあるから，図(b)に示すように，外側の導体より漏れ磁束は多く，したがって，漏れリアクタンスが大きくなるような構造になっている。このような構造のため，すべり周波数 sf_1 [Hz] の大きな始動時は，内側導体のインピーダンスが外側導体のインピーダンスより大きいので，電流の大部分は抵抗の大きな外側導体を流れる。始動後は，すべり s が0に近づくので，リアクタンスは減少し，電流の大部分は抵抗の小さな内側導体を流れるようになる。すなわち，大きな二次抵抗で始動して始動特性を改善し，運転中は小さな二次抵抗で運転効率をよくしている。

図2は，内側導体によるトルク T_i [N·m] と，外側導体によるトルク T_o [N·m] の特性を示す。二重かご形誘導電動機の特性は，これら二つの特性を加えたものとなる。

二重かご形誘導電動機は，特別の始動装置を用いないで，かなり大容量のものでも直接定格電圧を加えるだけで始動できるので，数

図2　二重かご形誘導電動機のトルク

キロワット以上の巻上機・空気圧縮機などの電動機に用いられる。

(2) 深みぞかご形誘導電動機

図3(a)は，深みぞかご形誘導電動機の回転子鉄心である。このような深いスロットの中に，幅が狭い平たい導体を押し込むと，始動時の漏れ磁束と電流密度は，図(b)に示すようになり，電流密度は，上部が密に下部が疎になる。始動後は，漏れリアクタンスが小さくなるため，その影響が少なくなり，電流密度は均一になる。

このことは，始動時には，二次周波数が高いので電流密度がいちじるしく不均一になり，二次導体のインピーダンスが増したことになるからである。また，始動後は，すべりが0に近づくので，漏れリアクタンスの影響が少なくなり，二次インピーダンスが減少するからである。したがって，二重かご形に近い性質をもたせることができる。

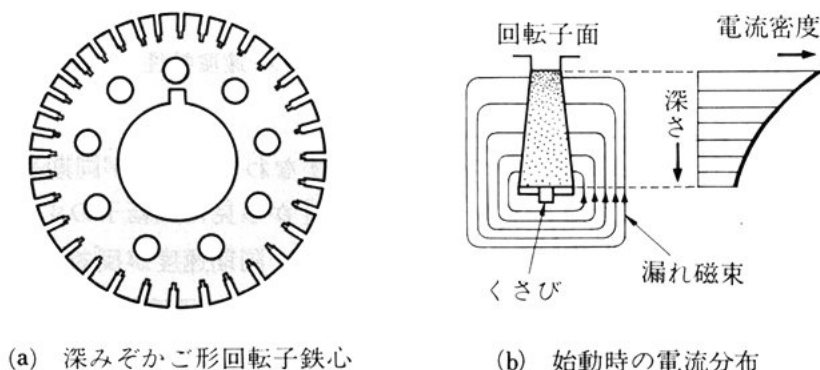
深みぞかご形誘導電動機の特性は，二重かご形誘導電動機と比べて，効率・力率はよいが，始動トルクは小さいので，連続運転用で始動トルクの小さなポンプや送風機に適している。

問 1. 二重かご形誘導電動機の原理を説明せよ。

問 2. 普通かご形誘導電動機には，大容量のものはない。なぜか。

図3 深みぞかご形

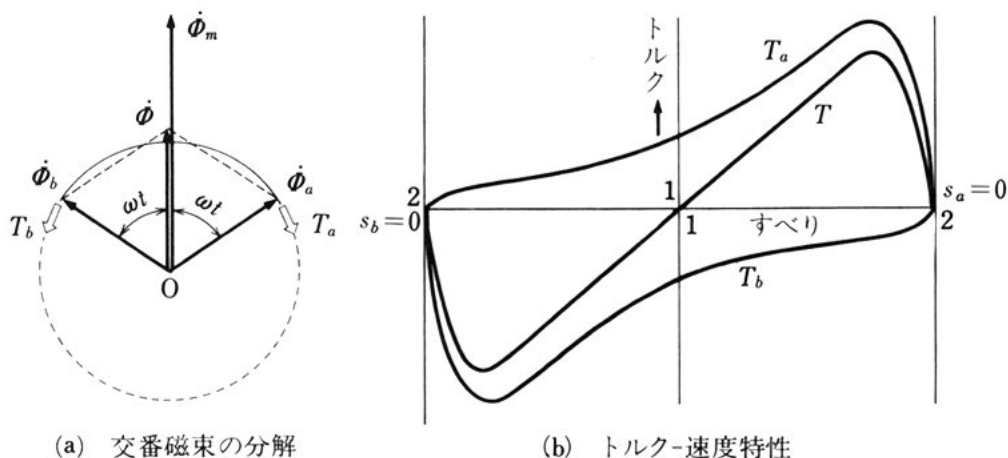
(a) 深みぞかご形回転子鉄心

(b) 始動時の電流分布

2. 単相誘導電動機

(1) 回転のしくみ

単相誘導電動機では，回転子は三相かご形誘導電動機と同じかご形回転子であるが，固定子巻線は単相巻線である。単相巻線では，交番磁界を発生しても三相巻線の場合のような一定の向きの回転磁界を生じない。しかし，交番磁束 $\dot{\Phi}$ は，図4(a)に示すように，大きさが最大磁束 Φ_m の $\frac{1}{2}$ で，同期速度で互いに反対向きに回転する二つの回転磁束 $\dot{\Phi}_a$，$\dot{\Phi}_b$ に分解して考えることができる。したがって，単相誘導電動機の回転子には，図(b)に示すように，Φ_a によるトルク T_a と，Φ_b によるトルク T_b とが互いに反対向きに作用し，その合成トルクは T になる*。したがって，なんらかの方法で，例

図4 単相誘導電動機の回路のしくみ

(a) 交番磁束の分解　　(b) トルク-速度特性

* トルク T_a [N·m] により，すべり s_a が0，すなわち回転子が同期速度 n_s [rpm] で回転しているとき，トルク T_b [N·m] から見た回転子のすべり s_b は $s_b=\frac{n_s-n}{n_s}=\frac{n_s-(-n_s)}{n_s}=2$ となる。これは，同期速度が反対向きと考えられるから，回転速度 n [rpm] は $n=-n_s$ となり，回転磁界の回転と反対向きに外力で強制的に回転させられていることになる。

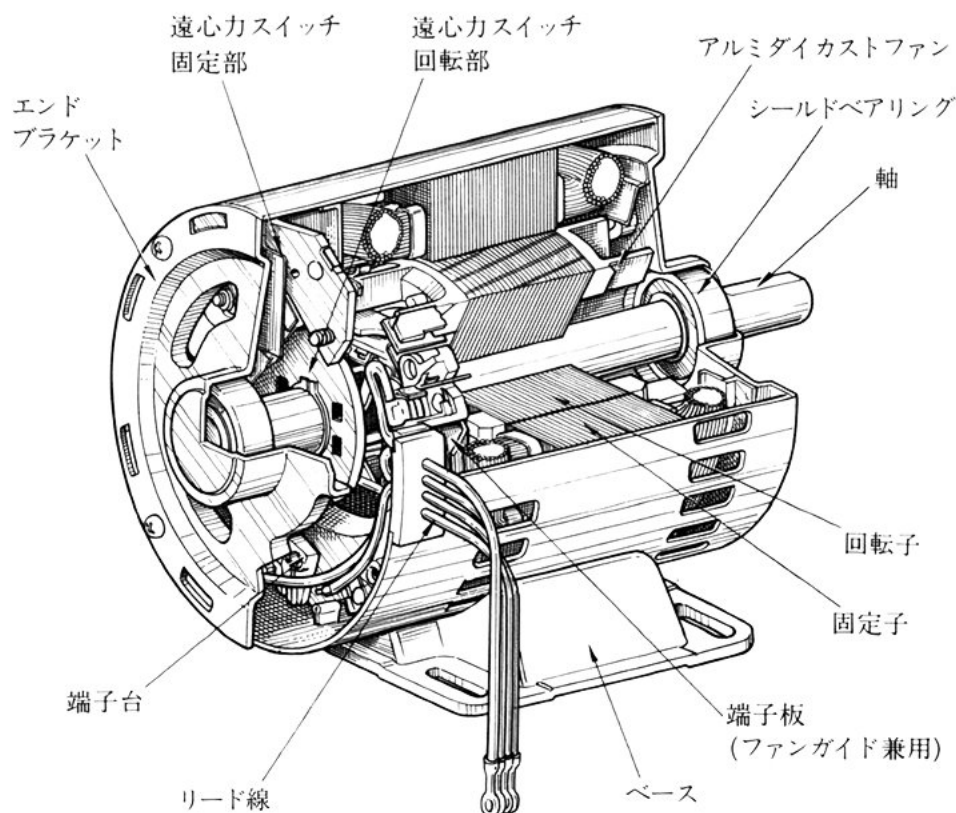



図 5　単相誘導電動機

えば時計回りに回転子を回してやれば，$T_a > T_b$ となって，回転が継続する。このことから，三相誘導電動機が運転中に，過負荷で1相のヒューズが切れた場合でも，回転を続けることがわかる。

単相誘導電動機は，図(b)の T からわかるように，始動トルクが働かないので，始動に対する工夫が必要である。

(2)　始動のしくみ

図6(a)に示すように，2組の固定子巻線M(主巻線)，A(始動巻線)を電気角で $\frac{\pi}{2}$ [rad] ずらした位置に設け，巻線Aにコンデンサを接続する。この2組の巻線に電圧を加えると，巻線Aに流れる電流は巻線Mに流れる電流より位相がほぼ $\frac{\pi}{2}$ [rad] 近く進む。したがって，電気基礎で学んだように，合成磁界は，図(b)の状態から電気

(a)　結線図

(b)　巻線Aによる磁界

(c)　巻線Mによる磁界

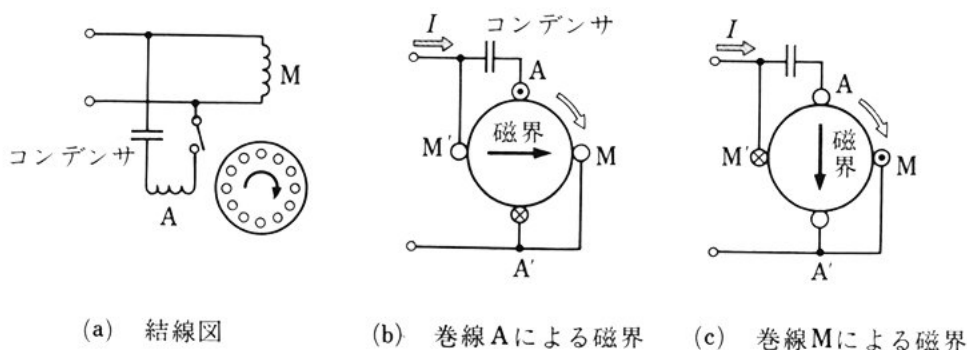



図 6　単相誘導電動機の始動のしくみ

角で $\frac{\pi}{2}$ [rad] に相当する時間が経過すると図(c)の状態となり，時計回りで大きさがほぼ一定の回転磁界となる。この回転磁界によって，三相誘導電動機と同じように，回転子に始動トルクが発生する。

巻線 A に直列に接続するコンデンサの静電容量が大きな場合には，始動トルクは大きくなる。しかしそのとき，巻線 A に流れる電流が大きくなって運転時に発熱するので，巻線 A を切り離さなければならない。そこで，回転速度が同期速度の 70～80 [%] 付近に達すると，巻線 A は自動的に切り離されるようになっている。

静電容量が小さな場合には，始動トルクは小さいが，コンデンサは接続したままでよく，力率もよくなる。

回転の向きを変える場合には，M または A の巻線のうち，一方の接続をつなぎ換える。

（3）　単相誘導電動機の始動法

コンデンサ始動形　図 7(a) に示すように，始動時にコンデンサを用い，運転時は単相誘導電動機として動作する。始動トルクが大きく，しかも始動電流は比較的少ないので，ポンプ・圧縮機・ボール盤などに用いられる。

永久コンデンサ形　図 7(b) に示すように，構造が簡単で，力率

(a) コンデンサ始動形

(b) 永久コンデンサ形　(c) くま取りコイル形

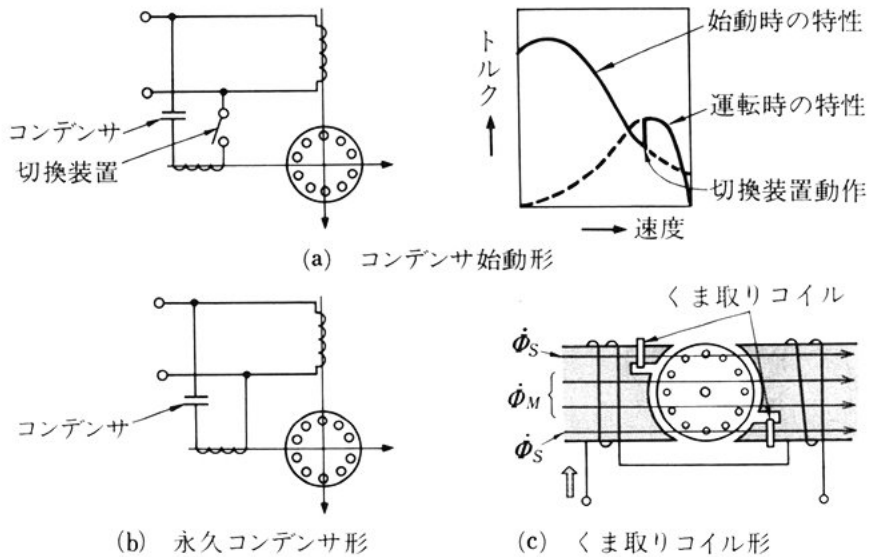



図 7 単相誘導電動機の始動法

もよく，トルクが均一で音が小さいという利点があり，卓上扇風機・電気洗濯機などに広く用いられる。

くま取りコイル形　図7(c)に示すように，固定子の各極を二つに分け，その一方に**くま取りコイル**とよばれる短絡された巻線を巻き，固定子巻線に単相交流電圧を加える。コイルのインダクタンスによって，磁束 $\dot{\Phi}_S$ [Wb] は $\dot{\Phi}_M$ [Wb] より位相が遅れ，$\dot{\Phi}_M$ が最大になってから，やがて $\dot{\Phi}_S$ が最大になり，磁束は時計回りに移動し，回転子は始動する。構造が簡単なので，小形の扇風機や換気扇などに用いられる。

問 3. 単相誘導電動機が自己始動できないのはなぜか。

3. 誘導電圧調整器

(1) 三相誘導電圧調整器

構　造　図8(a)は，**三相誘導電圧調整器**の例で，図(b)は，内部

(a) 外 観　(b) 固定子　(c) 回転子

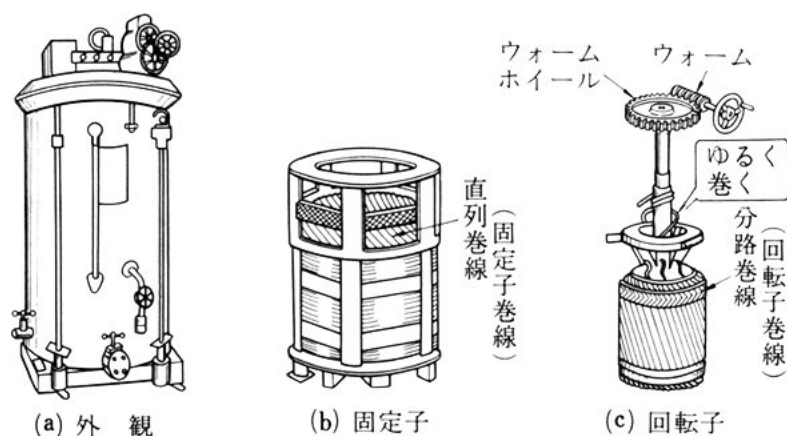



図 8 三相誘導電圧調整器の構造

にある固定子を取り出したものである。固定子の内部には，さらに図(c)に示す回転子があり，固定子と回転子には，スロットをもつ成層鉄心に三相巻線が施してある。このように，内部の構造は，三相誘導電動機の構造とほとんど同じである。

定格出力が600 [kVA] ぐらいまでは，極数は2で，それ以上の定格出力では4である。ふつうは回転子に一次巻線，固定子に二次巻線を施す。回転子巻線に電流を流す必要から，引き出し線をゆるく軸に巻き付ける。負荷電流が流れると，誘導電動機と同じようにトルクが発生し，回転しようとする。これを防ぐとともに，回転子を細かく回転調整するため，ウォームギヤを用いる。回転子軸は，ウォームとウォームホイールで押えておく。

小容量のものは，立て形か横形の乾式自冷式にするが，容量が5 [kVA] 以上になると，立て形油入自冷式とし，変圧器と同じように，放熱管または放熱器のついた外箱に収める。

原　理　図9(a)に示すように，回転子巻線（一次巻線）はY結線にして電源につなぎ，固定子巻線（二次巻線）は負荷に直列につなぐ。一次側に対称三相電圧を加えると，励磁電流が流れて，回転磁

(a) 結 線　　(b) ベクトル図

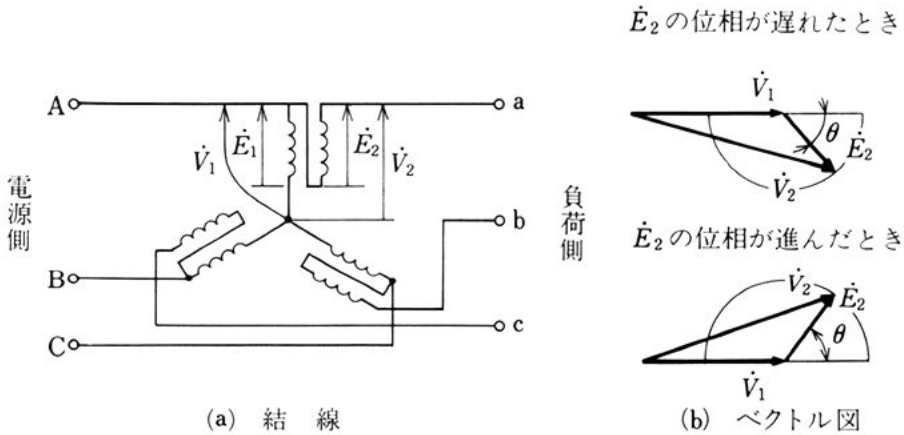



図 9 三相誘導電圧調整器の原理

界が生じ，一次巻線・二次巻線に，それぞれ E_1 [V], E_2 [V] の起電力が誘導される。

この誘導起電力 $\dot{E}_2$ [V] は，大きさが一定の回転磁界によって生じるのであるから，回転子と固定子との位置にかかわらず，つねにその大きさは一定であるが，位相は変化する。図(b)は，一次と二次の相電圧の関係を示すベクトル図で，回転子の位置によって，二次誘導起電力 $(\dot{E}_1+\dot{E}_2)$ [V] の大きさと位相が変わる。

三相誘導電圧調整器は，連続的に起電力を調整できるので，高圧配電線の電圧調整や，整流器・通信用電源などの精密な電圧・電流調整に用いられる。

問 4. 三相誘導電圧調整器によって 0〜200 [%] の起電力を得るには，一次巻線と二次巻線の巻数比をどのようにすればよいか。

問 5. 三相誘導電圧調整器によって電圧を調整する場合，出力電圧の位相も同時に変わる理由を述べよ。

（2） 単相誘導電圧調整器

図 10(a)は単相誘導電圧調整器の外観であり，図(b)はその原理図である。自由に回転できる回転子鉄心に一次巻線 P を巻き，固定子

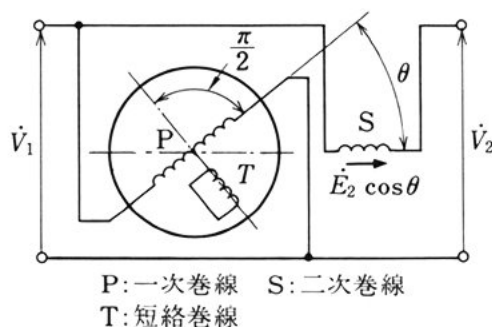
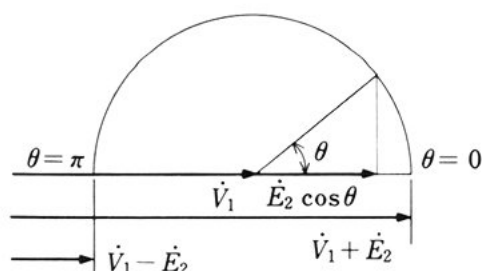
(a)　外　観

(b)　原理図

(c)　ベクトル図

図 10　単相誘導電圧調整器

鉄心に二次巻線Sを巻いてある。一次巻線Pを回転させることによって，二次巻線Sに誘導される起電力の大きさを連続的に調整できる。

原　理　図10(b)において，一次巻線Pを回転させると，一次巻線Pによる交番磁束のうち，二次巻線Sと鎖交する磁束が変化する。一次巻線と二次巻線の巻線軸が一致するとき，二次巻線Sに誘導される起電力は最大で，この値を E_2 [V] とすると，両巻線軸間の角が θ [rad] のときの起電力の大きさは $E_2 \cos\theta$ [V] となる。したがって，二次電圧 V_2 [V] は次の式で表される。

$$V_2 = V_1 + E_2 \cos\theta \qquad (1)$$

図10(c)からもわかるように，二次電圧 V_2 [V] は，θ を0から π [rad] まで変化させることによって，$V_1 + E_2 \sim V_1 - E_2$ の範囲で，連続的に調整することができる。なお，三相誘導電圧調整器の場合と

違い，一次電圧 $\dot{V}_1$ [V] と二次電圧 $\dot{V}_2$ [V] はつねに同相である。また，短絡巻線が用いられるのは，負荷電流が流れた場合，漏れ磁束が大きくなって，電圧変動率が大きくなるのを防ぐためである。

定格容量　一般に，電圧調整器の定格容量 P_a [kVA] は，調整できる容量，すなわち**自己容量**で表される。

$$P_a = E_2 I_2 \times 10^{-3} \qquad (2)$$

問 6．単相誘導電圧調整器において，一次電圧 V_1 が 200 [V]，二次巻線 S に誘導される最大起電力 E_2 が 100 [V] である。一次，二次巻線の軸間の角 θ が 0°，30°，60°，90°，120°，150°，180° のとき，二次電圧 V_2 [V] はそれぞれいくらか。

問　題

1．コンデンサ始動形単相誘導電動機がある。図 11 に示すように，4 本の口出線を図 (a) に示すようにつなげば時計回りに回転し，図 (b) に示すようにつなげば逆時計回りに回転するという。その理由を説明せよ。

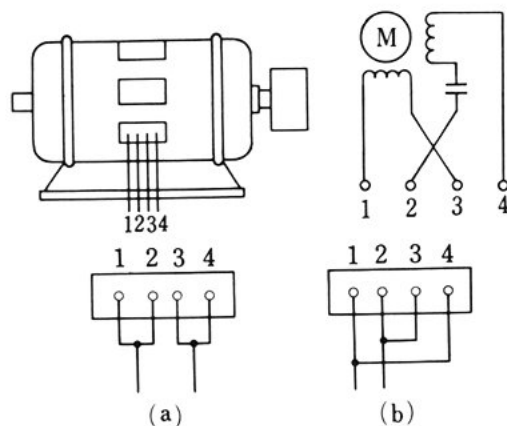



図 11

2．三相誘導電動機は，一次側の三相巻線中の一つの巻線が運転中に断線しても運転を続けるが，停止しているときに，三相電圧を加えても始動しないのはなぜか。

3．三相誘導電動機の単相運転の方法について説明せよ。

4．単相誘導電圧調整器は，ふつうの変圧器と比べて構造上どんな点が最も異なるか。

交流整流子電動機

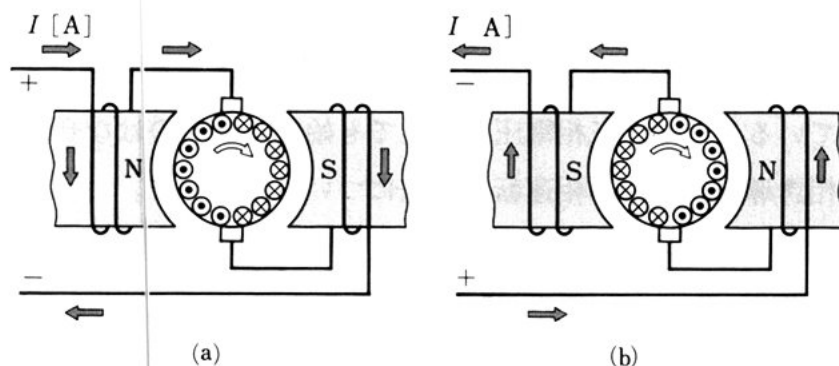
この節の目標　交流整流子電動機は特別な制御装置を必要とせず，交流電源に直接接続して使用できる可変速度電動機である。直流電動機の回転子と，誘導電動機の固定子とを組み合わせたような構造で，広い範囲で優れた運転効率と速度特性をもっている。

ここでは，交流整流子電動機のうち，現在実用されているものについて，その原理・特性・用途などを調べる。

1.　単相直巻整流子電動機

原　理　図1(a), (b) に示すように，直流直巻電動機に加える直流電圧の極性を変えても，磁束と電機子電流 I [A] の向きがともに逆になるので，トルクおよび回転の向きは変わらない。したがって，これに交流電圧を加えても，つねにトルクの向きは変わらず，回転は継続する。これが**単相直巻整流子電動機**で，原理は直流直巻電動機と同じである。

構　造　直流直巻電動機をそのまま交流用に用いると，鉄心が

図 1　単相直巻整流子電動機の原理

熱くなり，力率が低下し，整流がわるくなって，電動機として使えなくなる。そこで，交流用の単相直巻整流子電動機では，次に示す構造上の工夫がいろいろとなされている。

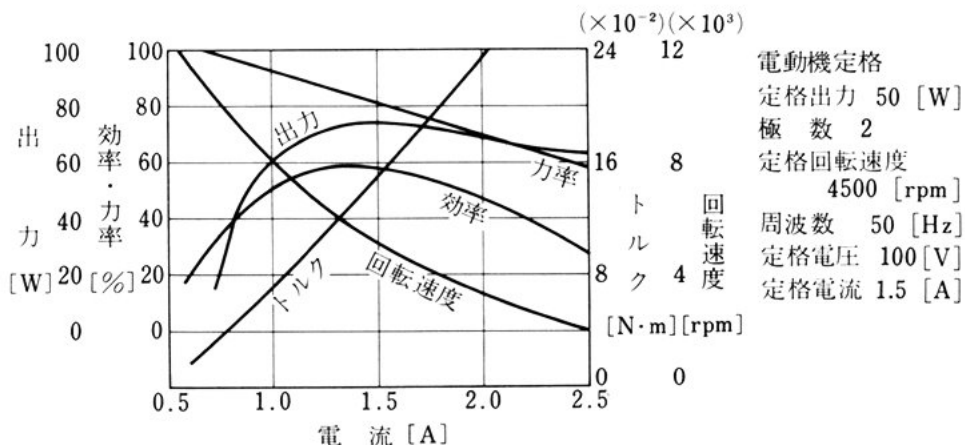
1) 磁気回路の磁束が交番するので，界磁鉄心および継鉄も成層鉄心を用い，鉄損を少なくする。

2) 界磁巻線のリアクタンスのために，力率が低下するから，界磁巻線の巻数を少なくする。

3) ブラシで短絡されるコイルには，界磁磁束の交番によって，誘導起電力が発生し，短絡電流が流れて整流がわるくなるので，コイル数を増して一つのコイルの巻数を少なくする。

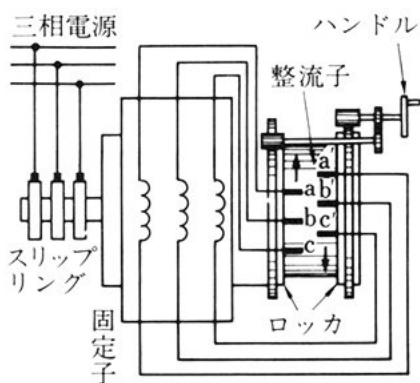
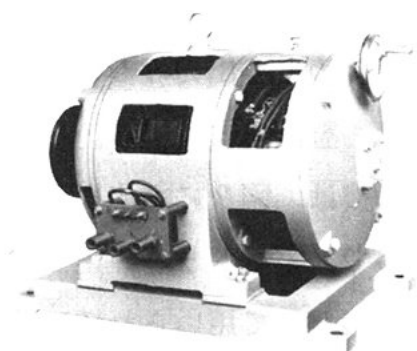
4) 電機子反作用を打ち消すために，きわめて小出力のもののほかは，直流機で学んだ補償巻線を設け，整流をよくする。

特性および用途　単相直巻整流子電動機は，図 2 に示すように，始動トルクが大きく，回転速度が大きいので，電気ドリル・電気かんな・電気掃除機・小形ミキサなどの電動機として用いられている。なお，これらの小容量のものは補償巻線を設けず，交直両用に使用できるので，**交直両用電動機**ともよばれる。なお，我が国では，小容

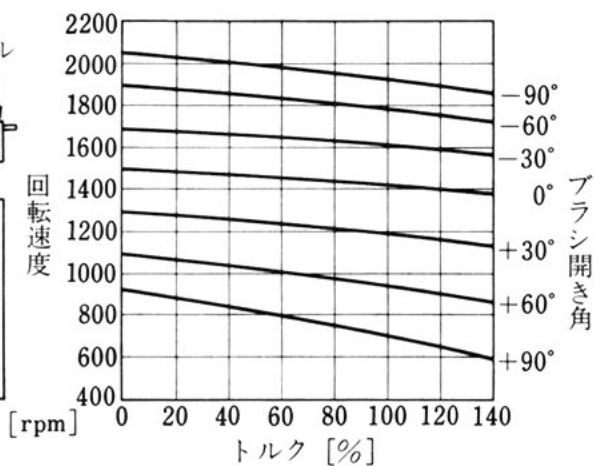
図 2　交直両用電動機の特性曲線

量のものだけが実用されているが，ヨーロッパでは，大容量のものが，単相交流電気鉄道の電動機として用いられている。

2. シュラーゲモータ

シュラーゲモータ（Schrage motor）は，図3(a)に示すように，巻線形誘導電動機の回転子に，さらに整流子をつけて，これに直流機の電機子巻線を施した構造になっている。

図3 シュラーゲモータ

ブラシは，それぞれロッカに固定され，ハンドル操作によってaとa′，bとb′，cとc′のブラシ間隔が調整される。

(a)

電動機定格
定格出力 2.2〜0.73 [kW] 極数 4
周波数 50[Hz] 定格回転速度 2000〜650 [rpm]
定格電圧 200 [V] 定格電流 9.1 [A]

(b) 特　性

この電動機は，図(b)に示す特性をもち，整流子のブラシ開き角を加減することによって，円滑・広範囲に回転速度を制御することができる。しかも負荷や電源の変動にほとんど影響されない，高効率・高力率で運転ができ，始動電流も小さいなどの利点があり，印刷機・リフト・ポンプなどに使われてきた。

問題

1. 次の電動機の回転の向きを逆にするにはどうすればよいか。

(1) 単相直巻整流子電動機　(2) シュラーゲモータ

2. 単相直巻整流子電動機は，直流直巻整流子電動機と比べてどんな点が違うか。また，直流直巻電動機をそのまま交流用の直巻電動機として用いることができないのはなぜか。

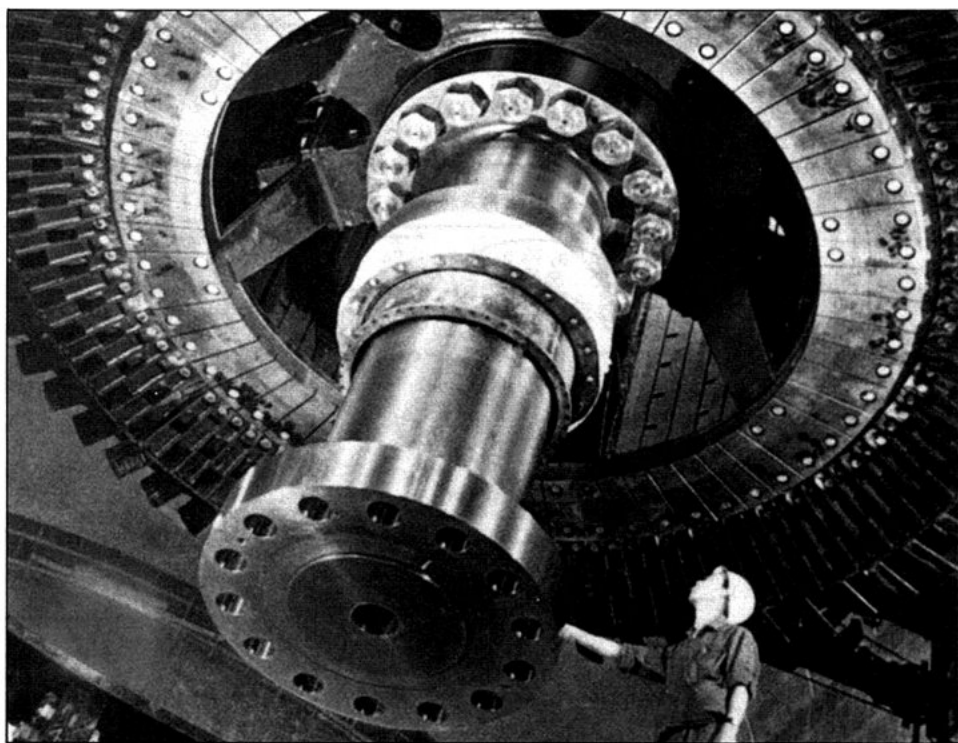
第5章

同期機

定常運転状態で，その回転速度がエアギャップの回転磁界と同期するものを同期機といい，その回転速度を同期速度という。

現在，発電所で運転されている発電機は，一定周波数の交流電圧を得るため，同期速度で回転させる同期発電機である。

また，この同期発電機は，電機子巻線に交流電圧を供給すると，同期速度で回転する電動機となる。これが同期電動機である。

この章では，これらの原理・構造・特性・運転法および用途などについて調べる。

同期発電機の回転子

1 三相同期発電機

この節の目標　発電所で発生している巨大な電力は三相交流であり，その三相交流を発生する発電機は三相同期発電機である。

ここでは，三相同期発電機の原理および構造について調べ，その電気回路がどのように構成されているかについて理解し，その特性も調べる。また，実際には，発電機は並列に接続して運転することが多いので，並行運転についても理解を深める。

1. 三相同期発電機の原理と構造

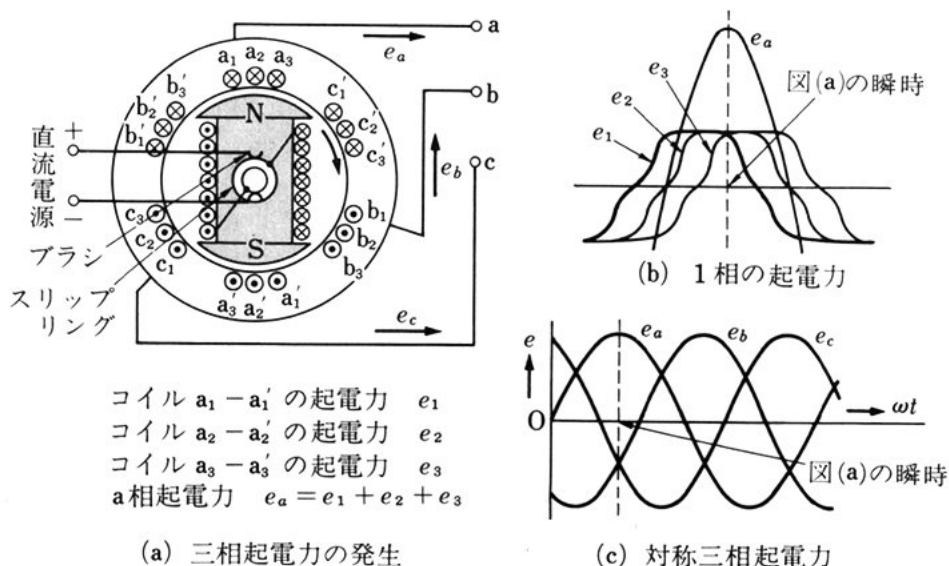
(1) 原　理

図1(a)は，三相同期発電機の原理図である。電機子巻線は，三相巻線（電気角で $\frac{2}{3}\pi$ [rad] ずつへだてて巻いた3組のコイル）で，磁極

図1　三相同期発電機の原理

コイル a_1-a_1' の起電力　e_1
コイル a_2-a_2' の起電力　e_2
コイル a_3-a_3' の起電力　e_3
a相起電力　$e_a=e_1+e_2+e_3$

(a) 三相起電力の発生

(b) 1相の起電力

(c) 対称三相起電力

は，外部の直流電源からブラシとスリップリングを通して励磁されている。

対称三相起電力の発生　原動機によって，磁極を図1(a)の矢印の向きに回転させると，各相とも図(b)に示す起電力が誘導され，それらの起電力を同時にみると，図(c)の対称三相起電力になる。

同期速度　磁極が1回転するとき，起電力の変化は，図2(a)の2極では1周波，図2(b)の4極では2周波となる。したがって，p極の発電機では，磁極が1回転すると，起電力は$\frac{p}{2}$周波変化する。そこで，回転速度が同期速度n_s［rpm］に等しいときの周波数f［Hz］は，次の式で表される。

$$f=\frac{p}{2}\cdot\frac{n_s}{60}=\frac{pn_s}{120}\qquad \text{ゆえに，}\qquad n_s=\frac{120f}{p}\qquad (1)$$

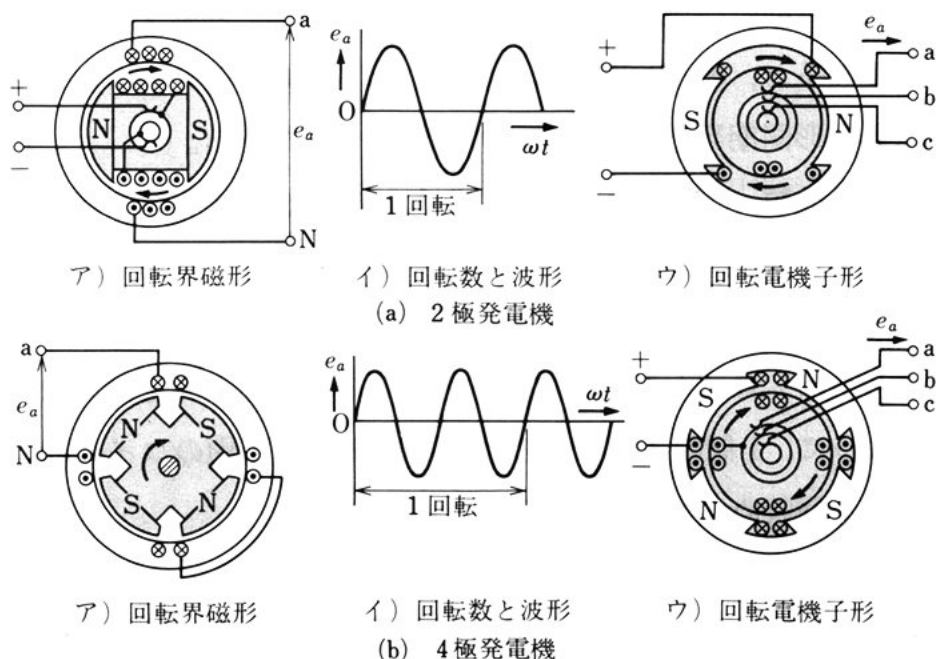
例えば，交流発電機の極数pが4であれば，50［Hz］の交流を発生させるには，交流発電機を同期速度1500［rpm］で回転させる必

図2　発電機の形式

ア）回転界磁形　イ）回転数と波形　ウ）回転電機子形

(a)　2極発電機

ア）回転界磁形　イ）回転数と波形　ウ）回転電機子形

(b)　4極発電機

要があり，60 [Hz] の交流を発生させるには，同期速度 1800 [rpm] で回転させる必要がある。

このように，極数 p の交流発電機で，一定周波数 f [Hz] の交流を発生させるには，式（1）の同期速度 n_s [rpm] で交流発電機を回転させる必要がある。このような発電機を**同期発電機** (synchronous generator) という。

回転界磁形と回転電機子形　交流発電機では，図2に示すように，磁極を回転させてもよく，電機子を回転させてもよい。図2ア) は**回転界磁形同期発電機**，ウ) は**回転電機子形同期発電機**とよばれる。

回転界磁形では，スリップリングが2個でよく，また電機子巻線が静止しているので，絶縁が容易で，大きな電流を取り出すことができる。したがって，大容量の発電機は，すべて回転界磁形である。

問 1. 24極の発電機を，50 [Hz] で運転するときの同期速度を求めよ。

（2） 構　　造

一般に，回転機械の構成は，大きく分けると，回転する部分すなわち**回転子**と，静止している部分すなわち**固定子**とになる。図3は，回転界磁形同期発電機の固定子の断面の一部である。

電機子巻線　図4(a)は，あらかじめ巻枠に絶縁銅線を巻いて作ったコイルを絶縁処理したもので，**型巻コイル**とよばれる。固定子のスロットに収めるとき，図3または図4(b)に示すように，コイル辺の一方はスロットの下部に，他方は他のスロットの上部に入れる。このように，1個のスロットの上下層にまったく別のコイルのコイル辺を2個収める巻き方を**二層巻**という。

回転子磁極のN極の中心から隣のS極の中心までの間隔を**極ピッチ**といい，コイルピッチと同様に，電気角 [rad]，距離 [mm] ま

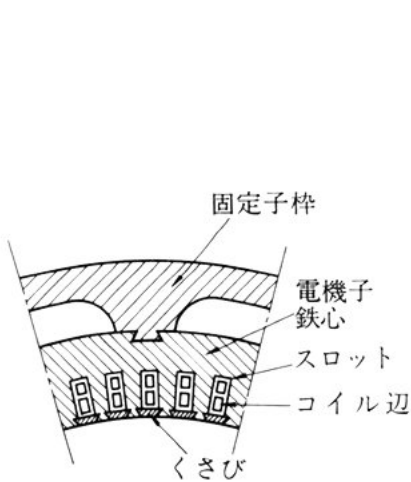



図3 固　定　子

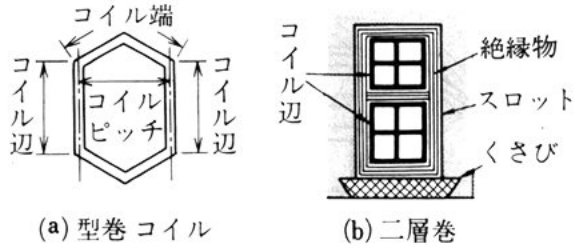
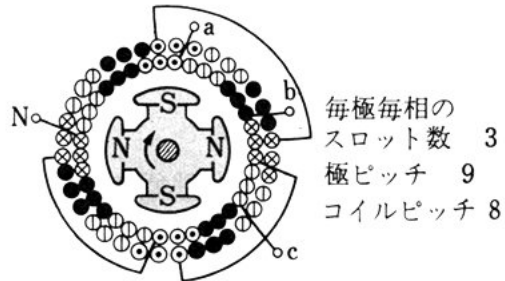



図4 電機子巻線

たはスロット数で表す。電機子巻線には，全節巻と短節巻が用いられる。全節巻はコイルピッチと極ピッチが等しい巻線法であり，短節巻はコイルピッチを極ピッチより短くした巻線法である。短節巻は，誘導起電力は低くなるが，コイル端を短くできる，電圧波形を改善できるなどの利点があるため，よく用いられる。図4(c)は巻線法の例である。

一般に，発電機の端子電圧は，各巻線の直列回路の合成電圧である。これを大きくするには，それに応じた絶縁材料を用いる必要があり，一般に20000 [V] が限度とされている。

電機子鉄心　電機子鉄心は，電機子巻線を保持し，図5に示すように，磁束の通路の役目をもっ

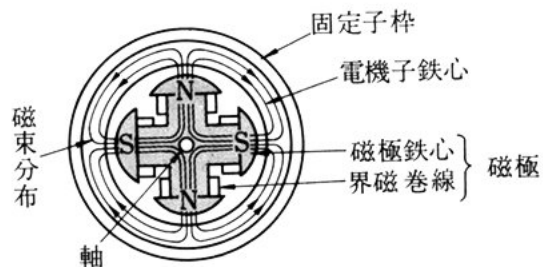



図5 磁極による磁束分布

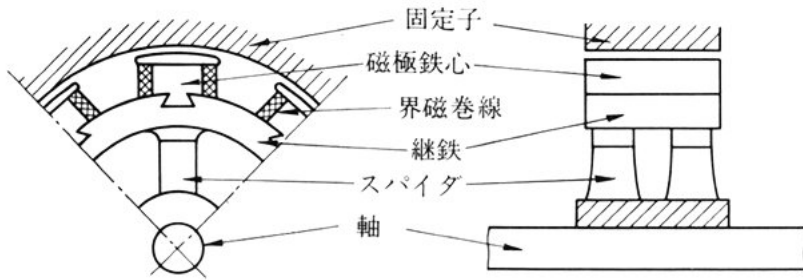
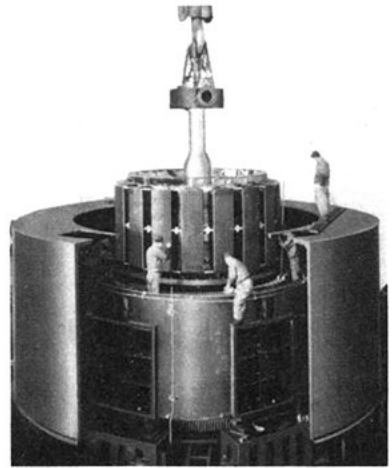



図6 回 転 子

ている。

鉄心中の磁束は，磁極の回転によって変化するから，ヒステリシス損を少なくするために，けい素鋼板を用い，渦電流損を少なくするために，厚さ0.35～0.5 [mm] の薄い材料を必要な厚さまで積み重ねて，固定子枠に組み立てて用いる。

図 7 三相同期発電機の回転子

回転子　回転子は，図 5, 6 に示すように，軸・継鉄・磁極などからできている。軸と継鉄はスパイダで連結され，継鉄と磁極はボルト締めまたは，くさび止めで取り付けられる。磁極は，磁極鉄心と界磁巻線からできている。磁極鉄心は，厚さ 1.6～3.2 [mm] のけい素鋼板を積み重ねたものが多く，界磁巻線には，丸銅線または平角銅線が用いられる。

問 2. 磁極鉄心の薄鋼板は，電機子鉄心より厚くてよいのはなぜか。

2. 三相同期発電機の等価回路

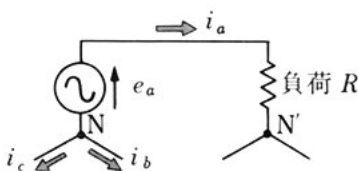
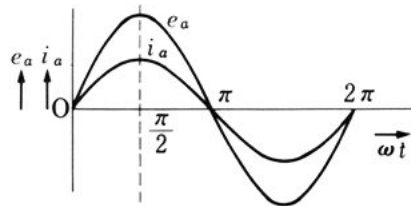
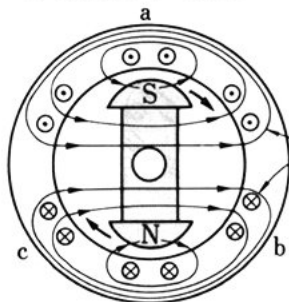
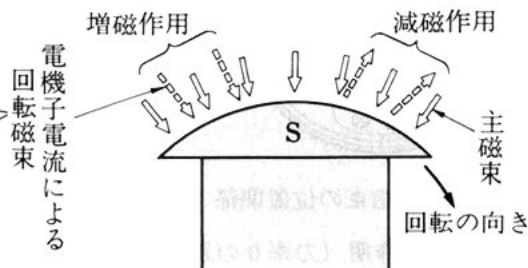
(1) 電機子反作用

原動機で，三相交流発電機の磁極を回転させると，その回転磁束によって，電機子巻線に三相交流起電力が誘導される。これに負荷を接続すると，電機子巻線に対称三相交流が流れ，そのため，新たに回転磁束が生じる。この回転磁束の同期速度は，回転磁極による回転磁束（主磁束）の同期速度と同じである。

そのため，電機子電流による回転磁束は，主磁束に対して一定の位置関係を保ちながら，主磁束に対し一定の大きさで影響を与える。同期発電機における電機子反作用は，このような形で現れる。

交さ磁化作用　図8(a)に示す負荷力率が1の場合の電機子反作用を考えると，次のとおりである。

図(b)の破線で示される時刻には，a相の起電力が最大であるか

図 8　交さ磁化作用（力率1の電機子電流による）

(a) 抵抗だけの負荷

(b) 図(a)の波形図

(c) 磁極に対する回転磁束の位置

(d) 交さ磁化作用

ら，磁極は図(c)の位置にくる。一方，電流 i_a [A] も最大であるから，電機子電流による回転磁束は，図(c)に示すように分布する。

すなわち，電機子電流による回転磁束の軸は，図(c)に示すように，つねに主磁束の軸に垂直であり，これらの磁束は磁極面に関して図(d)のように働く。これらの働きは交さ磁化作用と考えられる。

減磁作用と増磁作用　図9(a)に示す負荷力率が0の遅れ電流の場合を考えると，図(a)の破線で示される時刻には，回転磁束の分布は，図(b)に示すようになり，その向きは主磁束と逆になる。このように，力率が0の遅れ電機子電流による働きは減磁作用となる。

図10(a)に示す負荷力率が0の進み電流の場合，図(a)の破線で示される時刻には，回転磁束の分布は，図(b)に示すようになり，その

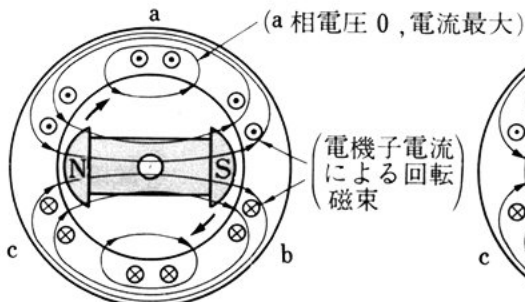
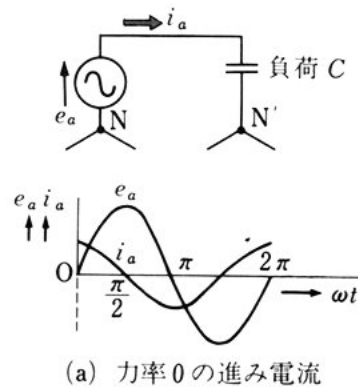
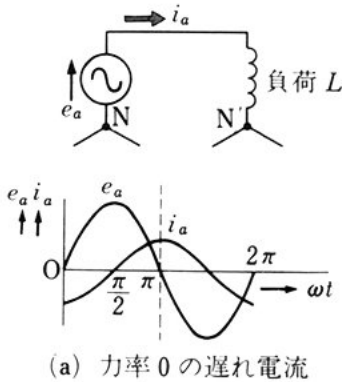
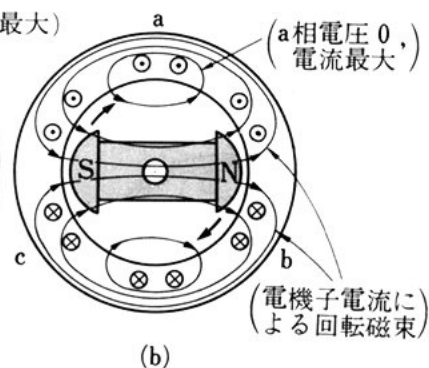



図 9　減磁作用（力率0の遅れ電機子電流による）

図 10　増磁作用（力率0の進み電機子電流による）

向きは主磁束と同じになる。このように，力率が0の進み電機子電流による働きは増磁作用となる。

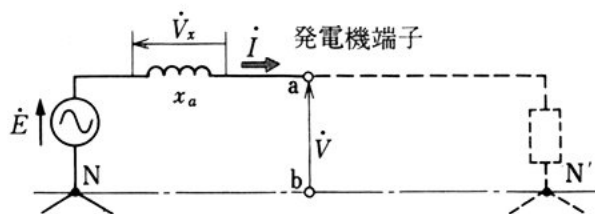
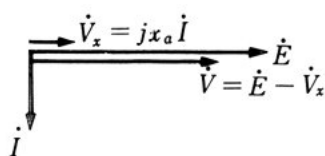
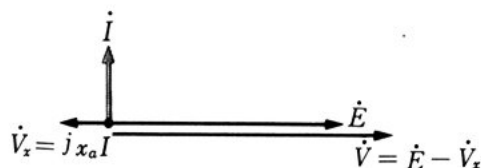
一般に，電機子電流 $\dot{I}$ [A] の位相が，誘導起電力 $\dot{E}$ [V] に対し，θ [rad] であるときの電機子反作用は，電流の有効分 $I\cos\theta$ によって交さ磁化作用が働き，無効分 $I\sin\theta$ によって，電流が遅れ電流であれば減磁作用，進み電流であれば増磁作用として働く。

問 3. 図9において e_a [V] が最大 (i_a [A] が0) の時刻における磁極の位置と回転磁束の分布を図示せよ。

(2) 発電機の等価回路

電機子反作用は，電機子電流によって生じる磁束が，直接，主磁束に働くものである。例えば，力率0の遅れ電流では減磁作用として働くため，誘導起電力は小さくなると考えられ，力率0の進み電流の場合は，誘導起電力は大きくなると考えられる。

電機子反作用によるリアクタンス　図11(a)は，誘導起電力 $\dot{E}$ [V] に直列にリアクタンス x_a [Ω] を接続したもので，次の関係がなりたつ。

図 11　電機子反作用によるリアクタンス

(a) 三相発電機1相分の回路図

(b) 力率0の遅れ電流の場合 $V<E$（減磁作用）

(c) 力率0の進み電流の場合 $V>E$（増磁作用）

$$\dot{V}_x = jx_a\dot{I},\qquad \dot{V} = \dot{E} - \dot{V}_x \tag{2}$$

いま，電機子電流 $\dot{I}$ [A] が力率0の遅れ電流のとき，端子電圧 $\dot{V}$ [V] はベクトル図(b)から求められる。また，電機子電流 $\dot{I}$ [A] が力率0の進み電流のときは，図(c)から求められる。すなわち，$\dot{E}$ [V] を主磁束による誘導起電力とすれば，電機子反作用としての減磁作用・増磁作用による起電力の増減は，リアクタンス x_a [Ω] の電圧降下 $\dot{V}_x$ [V] で表される。ここで，x_a [Ω] は**電機子反作用によるリアクタンス**とよばれ，電機子反作用を回路要素に置き換えたものである。

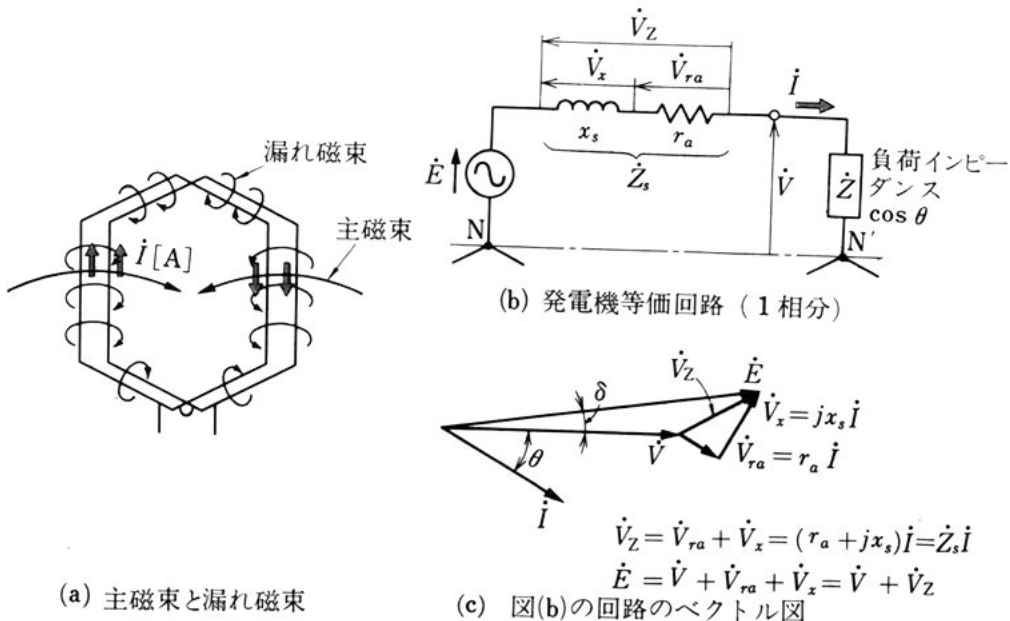
同期リアクタンス　電機子電流が作る磁束の中で，図12(a)に示すように，その磁路が主磁束の磁路を通らない磁束 Φ_l [Wb] がある。この漏れ磁束の効果もリアクタンスに置き換えられ，**漏れリアクタンス** x_l [Ω] で表される。

x_a [Ω] と x_l [Ω] は，どちらもリアクタンスなので，この和を x_s [Ω] で表す。

図12　等価回路

(a) 主磁束と漏れ磁束

(b) 発電機等価回路（1相分）

(c) 図(b)の回路のベクトル図

$$x_a+x_l=x_s \quad (3)$$

この x_s [Ω] は同期発電機の**同期リアクタンス**とよばれる。

同期インピーダンス　電機子巻線は抵抗 r_a [Ω] をもっている。そこで，同期発電機1相分の等価回路を図12(b)に示す。そのインピーダンス $\dot{Z}_s$ [Ω] は，次の式で表される。

$$\dot{Z}_s=r_a+jx_s, \quad Z_s=\sqrt{r_a{}^2+x_s{}^2} \quad (4)$$

この $\dot{Z}_s$ [Ω], Z_s [Ω] は**同期インピーダンス**とよばれる。

図(c)は，ある負荷電流における同期発電機のベクトル図である。

問 4. 電機子反作用が，リアクタンスに置き換えられる理由を説明せよ。

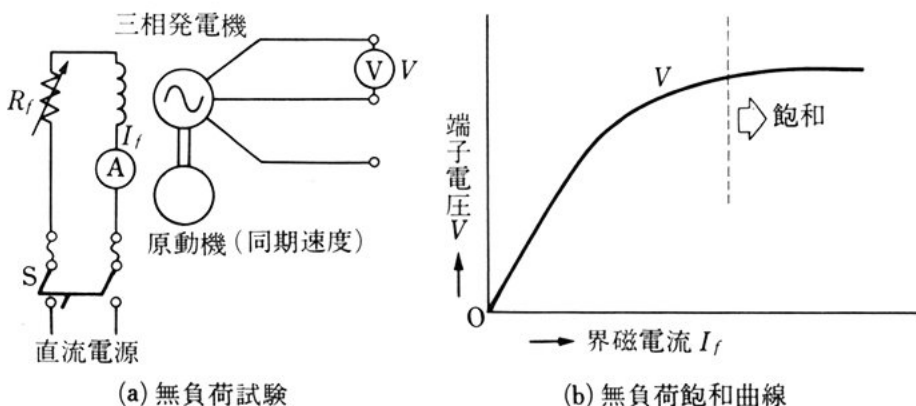
3. 三相同期発電機の特性

(1) 無負荷飽和曲線

図13(a)は，無負荷試験の接続図である。無負荷試験は次のようにして行う。

原動機を運転して，同期発電機の回転速度を定格回転速度とし，以後，一定に保つ。同期発電機の端子は，無負荷にしておく。可変

図 13　無負荷特性

(a) 無負荷試験　(b) 無負荷飽和曲線

抵抗 R_f [Ω] を最大にして，直流電源のスイッチSを閉じ，磁極を励磁する。次に，界磁電流 I_f [A] をしだいに大きくし，I_f と端子電圧 V [V] の関係を調べる。

いま，I_f によって生じる磁束を Φ [Wb] とすれば，$V \propto \Phi$ であり，Φ と I_f との関係は，磁極鉄心による飽和特性になるから，V と I_f との関係は，図13(b)に示すように飽和特性を示す。これを同期発電機の**無負荷飽和曲線**という。

問 5.　同期発電機の無負荷における界磁電流と端子電圧との関係は，飽和特性を示す。その理由を説明せよ。

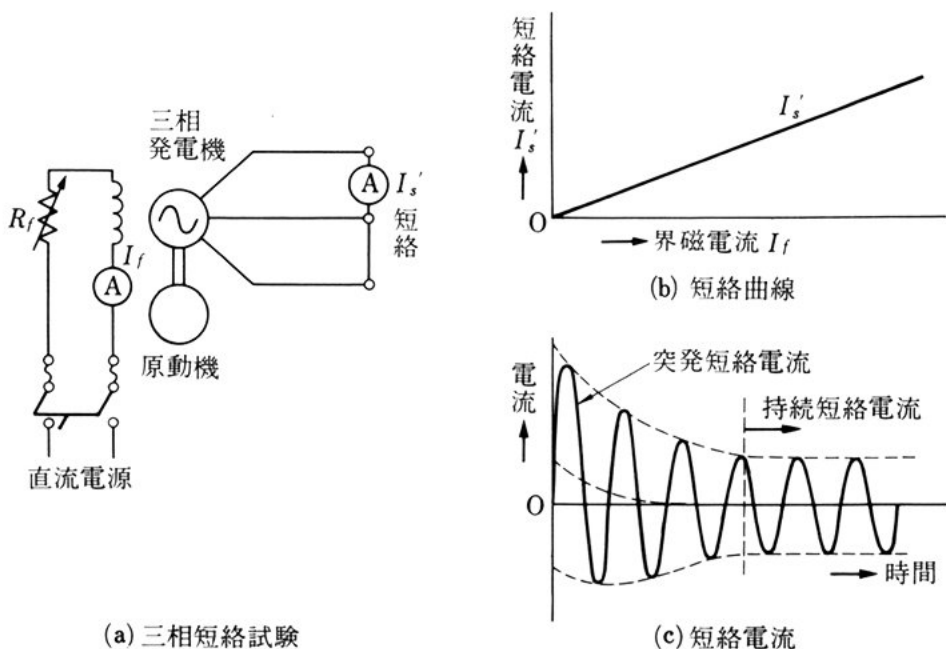
（2）　短　絡　曲　線

短絡曲線　図14(a)は，同期発電機の端子を電流計で短絡し，定格回転速度で運転して，界磁電流 I_f [A] と電機子短絡電流 I_s' [A] の関係を調べる三相短絡試験の接続図である。これを用いて I_f と I_s' を調べると，図(b)に示すように比例関係があることがわかる。

図 14　短絡曲線と短絡電流

(a) 三相短絡試験

(b) 短絡曲線

(c) 短絡電流

この特性曲線を**短絡曲線**という。

短絡電流　同期発電機が，定格回転速度・定格電圧・無負荷で運転中，突然三相短絡すると，図(c)に示す電流が流れる。

短絡直後は電機子反作用がないから，電流を制限するものは電機子抵抗と漏れリアクタンスだけで，非常に大きな電流が流れる。この電流を**突発短絡電流**という。

短絡後数秒で電機子反作用が現れるが，この場合の回路は誘導性であるから減磁作用となり，短絡電流は減少し，電流は同期インピーダンスで制限される値になる。この電流を**持続短絡電流**という。

問 6． 突発短絡電流と持続短絡電流について説明せよ。

（3） 同期インピーダンスの計算

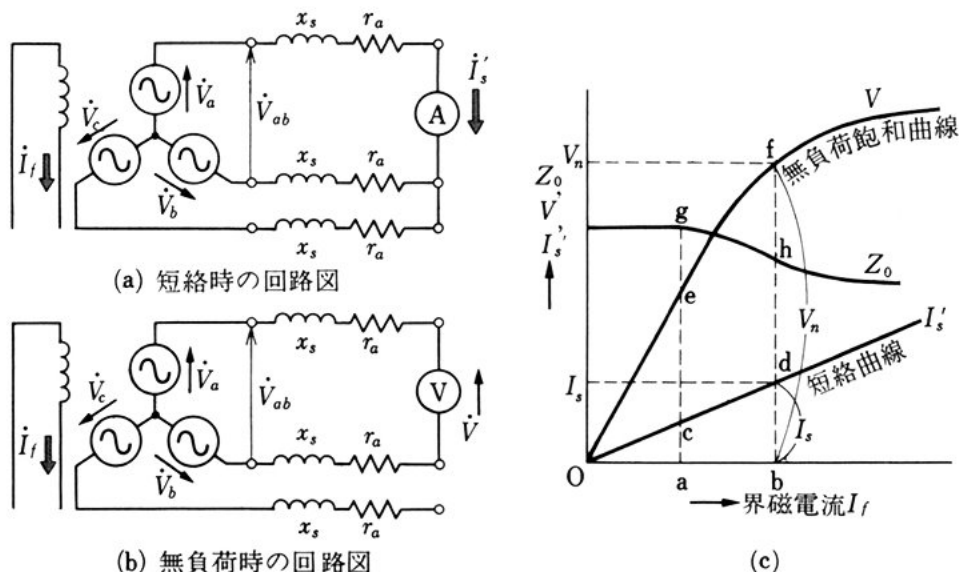
図 15(a)から，同期発電機 1 相分のインピーダンス Z_0 [Ω] は，次の式で表される。

$$Z_0=\frac{V_a}{I_s'}=\frac{\frac{V_{ab}}{\sqrt{3}}}{I_s'}=\frac{V_{ab}}{\sqrt{3}I_s'} \tag{5}$$

図 15　無負荷飽和曲線と短絡曲線

(a) 短絡時の回路図

(b) 無負荷時の回路図

(c)

ここで，V_a，V_{ab} [V] は，図(a)の回路からは測定できない。無負荷試験により，それと等しい界磁電流における電圧は測定できるから，この値を用いて，図(c)から，次の式によって計算する。

$$Z_0=\frac{V_{ab}}{\sqrt{3}\,I_s'}=\frac{V}{\sqrt{3}\,I_s'}=\frac{\overline{\mathrm{ea}}}{\sqrt{3}\cdot\overline{\mathrm{ca}}}=\overline{\mathrm{ga}} \qquad (6)$$

この Z_0 は，端子電圧 V [V] が飽和特性をもつため，一定にならない。そこで，V [V] が定格電圧 V_n [V] に等しいときの値を用い，それを**同期インピーダンス**と定義し，Z_s [Ω] で表す。すなわち，図(c)から，次の式で表される。

$$Z_s=\frac{V_n}{\sqrt{3}\,I_s}=\frac{\overline{\mathrm{fb}}}{\sqrt{3}\cdot\overline{\mathrm{db}}}=\overline{\mathrm{hb}} \qquad (7)$$

また，**百分率同期インピーダンス** z_s [%] は，次の式で定義する。

$$z_s=\frac{Z_sI_n}{\frac{V_n}{\sqrt{3}}}\times 100=\frac{I_n}{I_s}\times 100 \qquad (8)$$

ここで，I_n [A] は定格電流であり，I_s [A] は，無負荷で定格電圧を発生する界磁電流と等しい界磁電流における短絡電流である。

問 7. 同期インピーダンスは，無負荷飽和曲線と短絡曲線から，どのように計算するか。

(4) 短　絡　比

図16において定格電圧 V_n [V] が発生しているとき，突然三相短絡したときの持続短絡電流は，式(7)の I_s [A] と等しくなる。この I_s が，定格電流 I_n [A] の何倍になるかを示す値を**短絡比**という。図16と式(8)から，短絡比 S は，次の式で表される。

$$S=\frac{I_{fs}}{I_{fn}}=\frac{I_s}{I_n}=\frac{100}{z_s} \qquad (9)$$

式(9)から，短絡比の大きな同期発電機は，同期インピーダンス

(a)

(b)

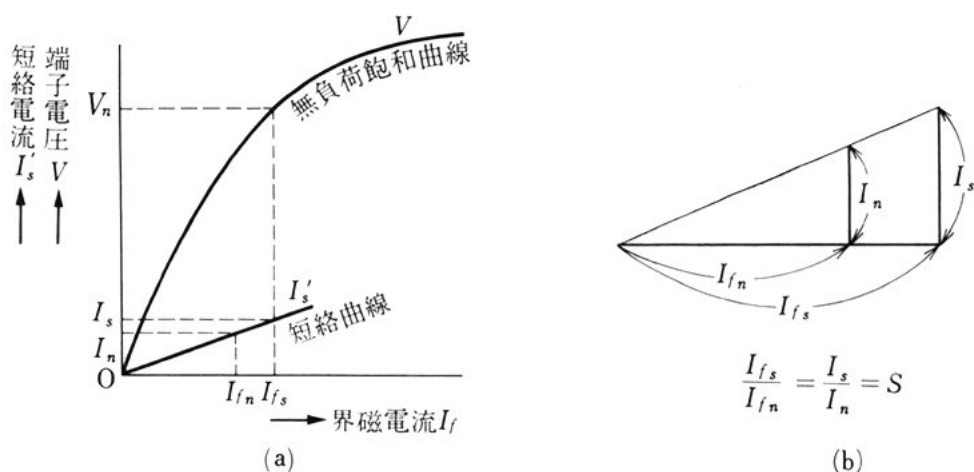



図 16　短絡比の算出

が小さく，短絡電流が大きいことがわかる。同期インピーダンスが小さいことは，電機子反作用が小さいことで，エアギャップが大きく，機械に余裕があり，電圧変動率も小さいが，価格は高くなる。一般に，短絡比は，0.6～1.2 程度に作られる。例えば，タービン発電機では 0.6～1.0，水車発電機では 0.9～1.2 程度である。

例題 1． 定格電圧 V_n が 6000 [V]，容量 P_a が 5000 [kVA] の三相同期発電機がある。界磁電流 200 [A] のもとで無負荷端子電圧は 6000 [V]，また，この界磁電流での三相短絡電流 I_s は 600 [A] であるという。この発電機の短絡比 S，百分率同期インピーダンス z_s [%]，同期インピーダンス Z_s [%] を求めよ。

解答 この発電機の定格電流 I_n [A] を求めると，

$$I_n=\frac{P_a}{\sqrt{3}\,V_n}=\frac{5000\times10^3}{\sqrt{3}\times6000}=481\ [\mathrm{A}]$$

となる。したがって，短絡比 S，百分率同期インピーダンス z_s [%] は，式 (9) から，

$$S=\frac{I_s}{I_n}=\frac{600}{481}=1.25,\qquad z_s=\frac{100}{S}=\frac{100}{1.25}=80\ [\%]$$

となる。また，同期インピーダンス Z_s [Ω] は，式 (7) から，

$$Z_s=\frac{V_n}{\sqrt{3}\,I_s}=\frac{6000}{\sqrt{3}\times 600}=5.77\ [\Omega]$$

となる。

問 8. 百分率同期インピーダンスと短絡比の関係を説明せよ。

問 9. 図 16 で，$I_{fs}=120$ [A]，$I_{fn}=100$ [A]，$V_n=6600$ [V] の三相同期発電機がある。$I_n=300$ [A] のとき，短絡比・百分率同期インピーダンス・同期インピーダンスを求めよ。

(5) 外部特性曲線

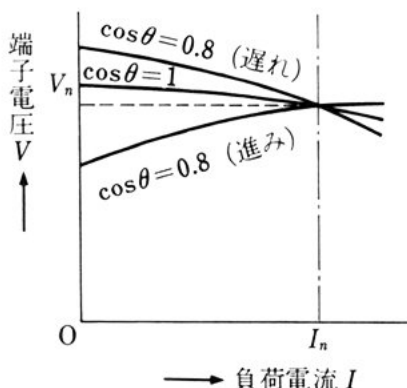
同期発電機の端子電圧 V [V] は，図 17 に示すように，負荷電流 I [A] や負荷力率によって変わる。界磁電流および負荷力率 $\cos\theta$ を一定に保ち，そのときの I と V の関係を示す曲線を**外部特性曲線**という。

問 10. 外部特性曲線が負荷力率によって変わるのはなぜか。

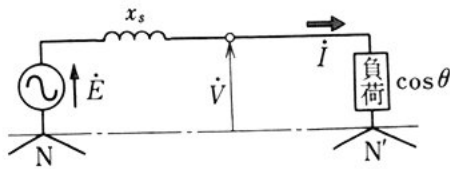
図 17 外部特性曲線

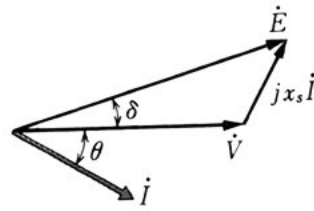
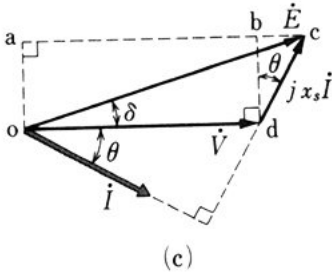
4. 三相同期発電機の出力と並行運転

(1) 出 力

同期インピーダンスは，$\dot{Z}_s=r_a+jx_s$ であるが，一般に，x_s [Ω] は r_a [Ω] に比べて大きいので，x_s に対して r_a を無視することができる。そのときの三相同期発電機 1 相分の等価回路を図 18 (a) に示し，そのベクトル図を図 (b) に示す。

図 18 (a), (b) から，同期発電機 1 相分の出力 P_s [W] は，次の式で表される。

$$P_s=VI\cos\theta \qquad (10)$$

(a) 同期発電機の等価回路

(b) 図(a)のベルトル図

$x_sI\cos\theta = E\sin\delta$

両辺に$\dfrac{V}{x_s}$を掛けて

$VI\cos\theta = \dfrac{VE}{x_s}\sin\delta$

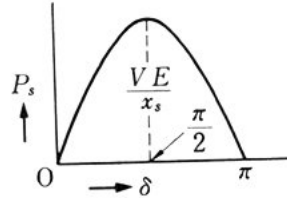
(c)

(d) 出力と負荷角

図 18　同期発電機の等価回路とベクトル図

さらに，図(c)から，P_s は次の式で表される。

$$P_s = VI\cos\theta = \frac{VE}{x_s}\sin\delta \qquad (11)$$

すなわち，V，E [V] および x_s が一定ならば，出力 P_s は，図(d)に示すように，δ の正弦関数で表される。そこで，$\dot{V}$ に対する $\dot{E}$ の位相差 δ を**負荷角**という。

なお，発電機が負荷に電力を送るには，δ は正，すなわち $\dot{E}$ は $\dot{V}$ より位相が進んでいなくてはならない。しかし，E の大きさは必ずしも V より大きくなくてもよい。

問 11．定格端子電圧が V_n [V]，定格電流が I_n [A]のとき，三相同期発電機の定格出力はいくらか。

(2) 並　行　運　転

2台以上の同期発電機を，一つの母線に並列に接続して運転することを**並行運転**という。**母線**とは，数個の電源と接続されている共通の導体で，図19の母線R，S，Tは2台の発電機A，Bと共通に

(a) 並行運転の接続図　　(b) 同期検定灯に加わる電圧

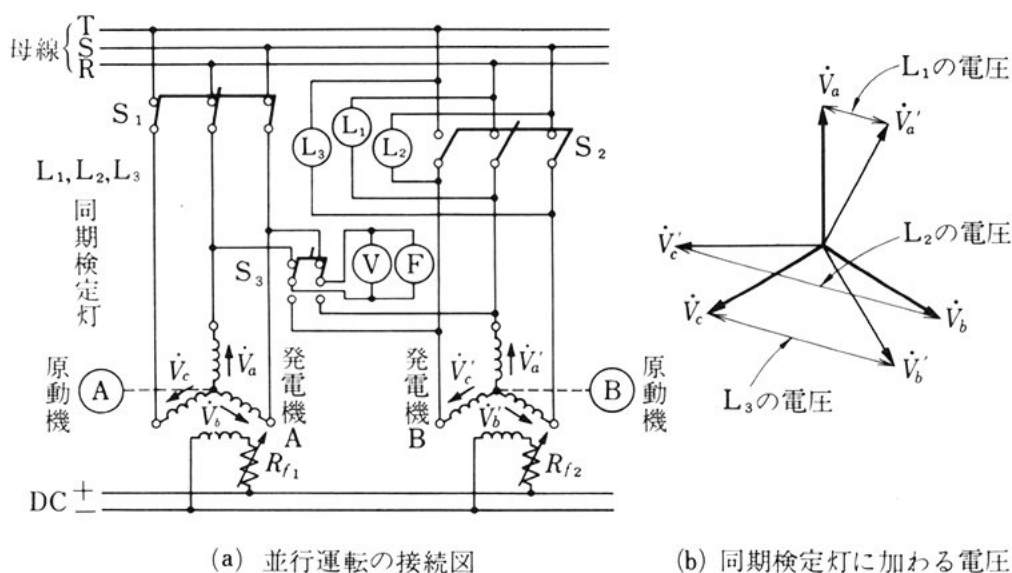



図 19　並　列　接　続

接続されている。

並列接続　図 19 (a) に示すように，同期発電機 A が運転している母線に，同期発電機 B を並列に接続するときの必要条件と，それを満たすための調整の方法を次に示す。

1) 同期発電機 A，B の起電力の周波数が互いに等しいことが必要である。このために，原動機 B の回転速度を調整して，周波数を等しくする。

2) A，B の起電力が互いに等しいことが必要である。このために，B の界磁抵抗 R_{f2} [Ω] を加減し，磁極の励磁を調整して，起電力を等しくする。

3) A, B の起電力の位相が一致していることが必要である。このために原動機 B の回転速度を調整して同期をとる。同期しているかどうかは，同期検定灯 L_1，L_2，L_3 の明るさの違いから判断する。同期すると，図 (b) のベクトル図からわかるように，ランプ L_1 が消え，L_2，L_3 の明るさが等しくなる。このときスイッチ

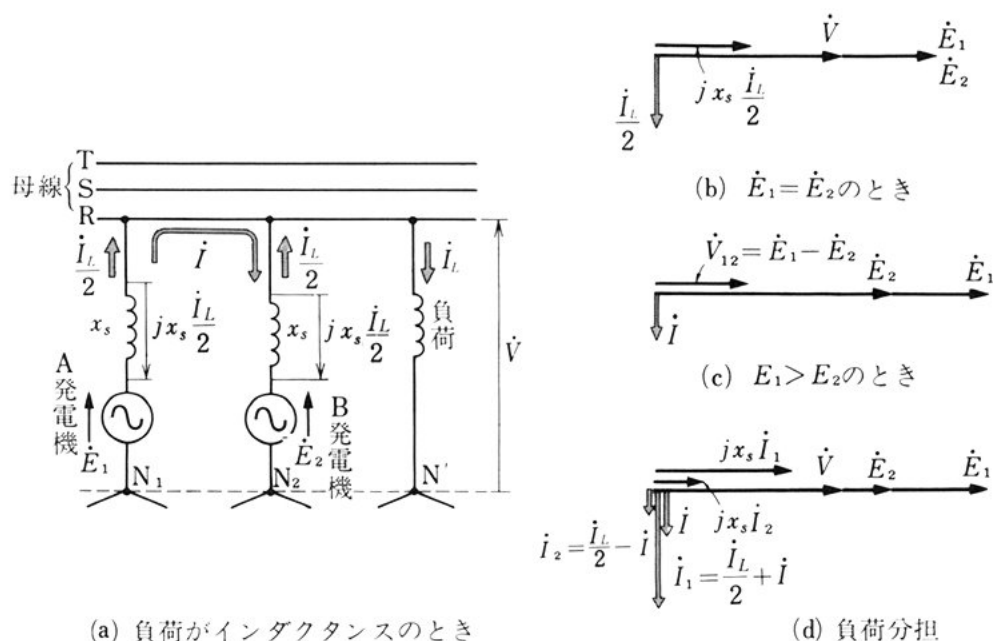



図 20　無効電流分担

S_2 を閉じて，同期発電機 B を母線に接続する。

無効横流　図 20 (a) は，同期発電機 A，B が並列に接続されて，インダクタンスだけの負荷に無効電力を供給している場合を示す図で，すべて 1 相分だけを示している。また，同期発電機 A，B の同期インピーダンスは等しいとする。

もし，$\dot{E}_1=\dot{E}_2$ [V] ならば，同期発電機 A，B には，どちらも $\frac{\dot{I}_L}{2}$ [A]の負荷電流が流れる。このときのベクトル図を図 (b) に示す。

いま，同期発電機 A の励磁を強め，または同期発電機 B の励磁を弱めると，$\dot{E}_1-\dot{E}_2=\dot{V}_{12}$ [V] の起電力の差により，同期発電機 A，B 間に循環電流 $\dot{I}$ [A] が流れる。この場合，回路要素は誘導リアクタンス x_s [Ω] が 2 個であるから，図 (c) に示すように，循環電流 $\dot{I}$ は，$\dot{V}_{12}$ より位相が $\frac{\pi}{2}$ [rad] だけ遅れる。したがって，この $\dot{I}$ は無効電流である。

このときのベクトル図を図 20 (d) に示す。同期発電機 A が分担す

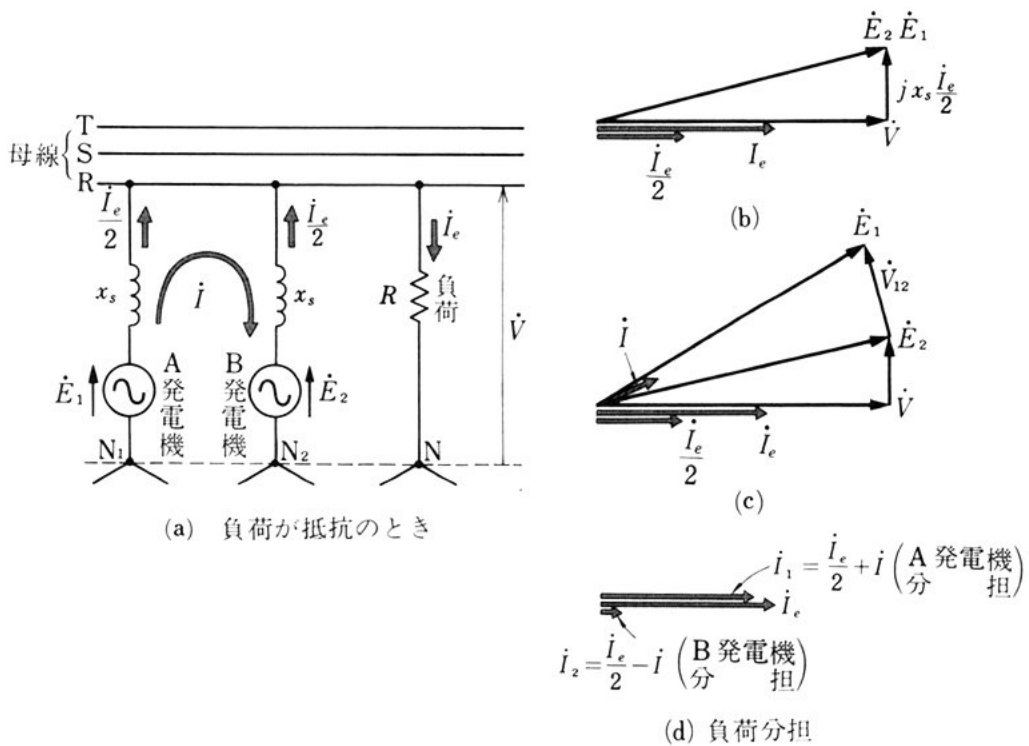



図 21　有効電流分担

る無効電流は $\dot{I}$ だけ増加し，同期発電機 B が分担する無効電流は $\dot{I}$ だけ減少するので，負荷の無効電流は変わらない。すなわち，励磁を加減すると循環電流 $\dot{I}$ が流れ，負荷の無効電流の分担が変わるだけである。この循環電流 $\dot{I}$ を**無効横流**という。

有効横流　図 21 (a) で，$\dot{E}_1=\dot{E}_2$ ならば，同期発電機 A，B とも負荷電流は $\frac{\dot{I}_e}{2}$[A] である。このときのベクトル図を図 (b) に示す。

いま，同期発電機 A の原動機の回転速度を速めると A の入力が増し，$\dot{E}_1$ の位相が進む。$\dot{E}_1$ の位相が進むと，$\dot{E}_1-\dot{E}_2=\dot{V}_{12}$ の起電力の差により，同期発電機 A，B 間に循環電流 $\dot{I}$ が流れる。そのときのベクトル図を図 (c) に示す。$\dot{I}$ は $\dot{I}_e$ とほとんど同相になるから，これを**有効横流**という。そこで，$\dot{I}_e$ と $\dot{I}$ を，図 (d) に示すように，同相とみなすと，同期発電機 A の負荷分担は増加し，同期発電機 B の

負荷分担は減少することがわかる。

負荷分担の移動　同期発電機Aから同期発電機Bへ負荷電流の分担を移動させるには，次のとおりにする。

1) 負荷が誘導性の場合には，Aの励磁を弱め，Bの励磁を強めると，負荷の遅れ無効電流の分担は，しだいにBに移動する。負荷が容量性の場合には，Aの励磁を強め，Bの励磁を弱めると，負荷の進み無効電流の分担は，しだいにBに移動する。

2) Aの回転速度を遅くし，Bの回転速度を速めると，負荷の有効電流の分担はしだいにBに移動する。

問 12.　一般に，負荷電流には，電圧に対して有効分と無効分がある。いま，同期発電機A，Bが，平等に負荷電流を分担しているとき，負荷電流の分担をすべて発電機Aへ移すには，どうすればよいか。

問 13.　図19(b)で，同期発電機A，Bの同期がとれているとき，三つのランプのそれぞれの明暗の状態は変わらない。もし，同期発電機Bの回転速度をおそくすれば，しばらくしてランプL_2は最も明るくなり，L_1もしだいに明るくなり，L_3は暗くなる。したがって，L_2-L_1-L_3の順に明るさが回転する。同期発電機Bの回転速度が速くなると，ランプの明るさの回転順序はどうなるか。

問 14.　図20(a)で，負荷が静電容量だけの場合，同期発電機Aの励磁を強めるとどうなるか。

問　　題

1． 図22は，三相同期発電機1相分の等価回路である。次の名称をいえ。

(a)　x_s　　　(b)　r_a

(c)　$\sqrt{r_a{}^2+x_s{}^2}$　または　(r_a+jx_s)

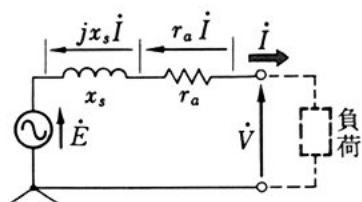
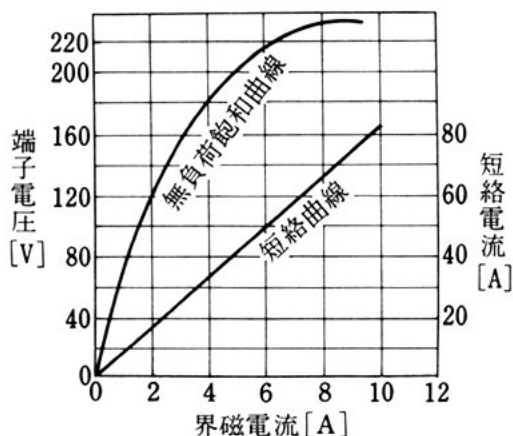



図 22

2． 図23は，220［V］，20［kVA］の三相同期発電機の無負荷飽和曲線と短絡曲線である。この発電機の同期インピーダンス・短絡比・百分率同期インピーダンスを求めよ。

図 23

3． 定格電圧・定格電流が等しい2台の三相同期発電機がある。同期インピーダンスが異なる場合，それらの構造や特性を比較せよ。

4． 並行運転中のA，B二つの三相同期発電機があり，その1相分を図24に示す。各発電機の1相分についての分担負荷が2432［kW］であって，相電圧が3800［V］，$I_1=1000$［A］，$I_2=800$［A］のとき，各発電機および負荷の力率，各発電機および負荷の電流の有効分・無効分，負荷の電流および電力を求めよ。

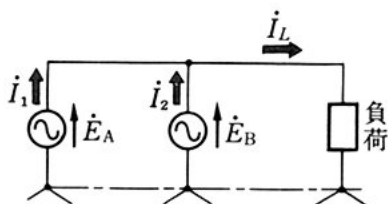



図 24

5． 前問で，Aの力率を1にするにはどうすればよいか。このとき，分担電力はどうなるか。

2 三相同期電動機

この節の目標　誘導電動機は，あるすべりで回転するが，同期電動機は，周波数と極数とで決まる一定の速度すなわち，同期速度で回転するので，誘導電動機とは異なった特性をもっている。

ここでは，同期電動機の回転原理を理解し，電気回路としての考え方やその取り扱いについて調べる。

また，その特性をよく理解し，それを生かした使用法などについて学ぶ。

1.　三相同期電動機の原理

(1)　ト　ル　ク

三相同期発電機は，三相同期電動機として働く。図1(a)は，三相同期電動機の原理図である。固定子の三相巻線に三相交流電流 i_a，i_b，i_c [A] が流れると，図(b)に示すように，回転磁束が発生する。図(b)で，固定子鉄心から磁束の出る部分N極をⓃで表し，磁束が固定子鉄心に入る部分S極をⓈで表すと，Ⓝ，Ⓢは，同期速度で相回転の向き（図(b)ではA-B-Cの時計回り）に回転する。

図2(a)に示すように，回転磁極N，Sが，Ⓝ，Ⓢと図に示すような位置関係を保って，同期速度で回転しているときは，SとⓃおよびNとⓈとの吸引力によって，回転子軸に時計回りのトルク T_1 [N･m] が生じ，逆トルク T_1' [N･m]（負荷トルク）に打ち勝って，同期速度の回転を継続する。

次に，負荷トルク T_1' [N･m] が小さくなれば，ⓃとSの間隔は小

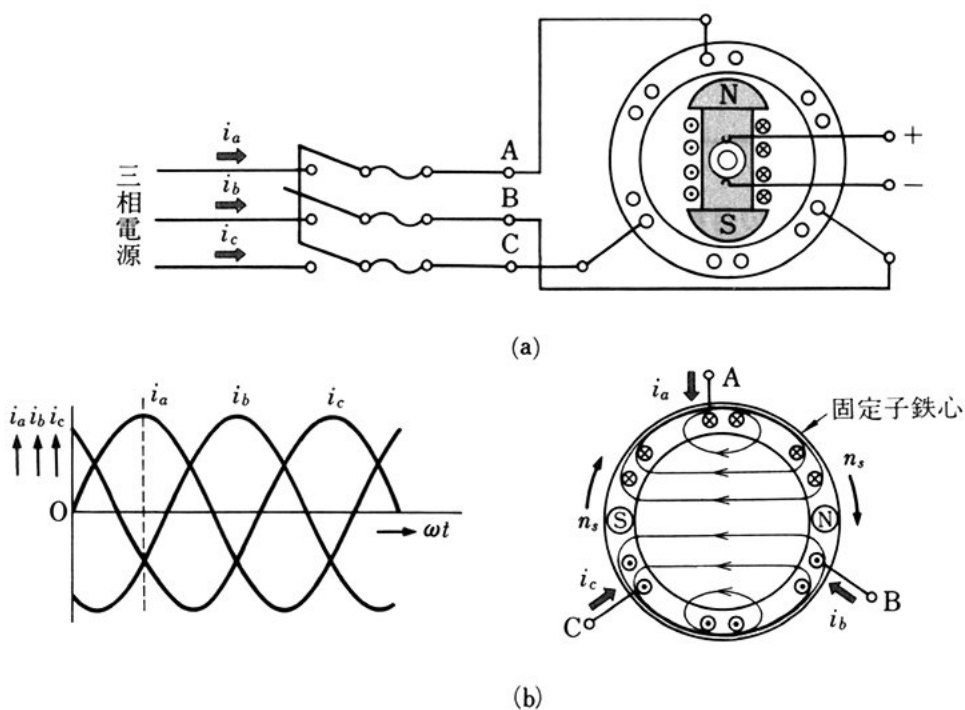



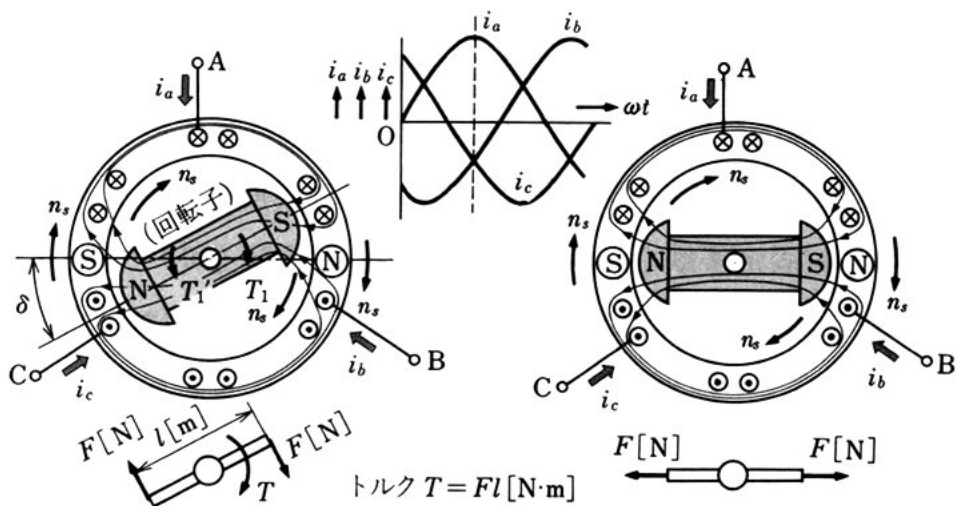
図 1　回転磁束と回転の向き

(a)　トルクの発生とつりあい　　　(b)　完全無負荷状態

図 2　トルクの発生とつりあい

さくなり，図(b)に示すように，T_1' が 0 [N•m]，すなわち完全無負荷になれば，T_1 も 0 [N•m] になる位置関係で回転する。

このように，回転子磁極は，電機子電流による回転磁束と等しい同期速度で回転し，負荷の増減によって，回転子磁極軸と回転磁束軸との位置関係 δ が変わるようになる。δ は**負荷角**とよばれる。

すでに学んだように，三相誘導電動機は，負荷が増加すると回転速度は小さくなるが，三相同期電動機では，負荷が増加すると δ が大きくなるだけで，δ が π [rad] より小さな場合には，回転速度は一定（同期速度）である。三相同期電動機で，負荷が大きくなり，δ が π [rad] を超えると，回転の向きと逆向きのトルクが発生し，回転できなくなり，停止してしまう。

問 1. 三相同期電動機は，同期速度以外では回転できない。なぜか。

（2） 発電機と電動機の等価回路表現

図 3(a) は，三相同期発電機の 1 相分を示す等価回路である。この図において，各電圧の間には，次の関係がなりたつ。

$$\left.\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{E} - r_a\dot{I}_G - jx_s\dot{I}_G = \dot{E} - (r_a + jx_s)\dot{I}_G \\ \text{ゆえに}\quad \dot{E} &= \dot{V} + (r_a + jx_s)\dot{I}_G \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

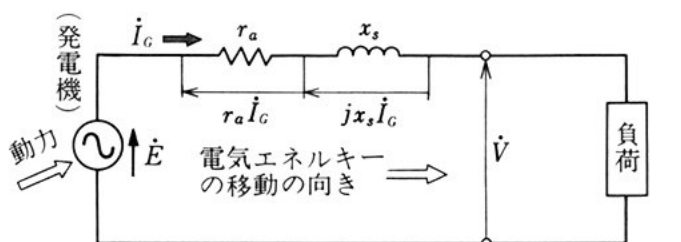
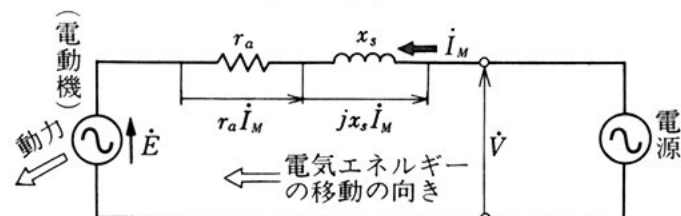
三相同期電動機は，構造的に同期発電機と同じであるから，その 1 相分についての等価回路は図 (b) となる。$\dot{V}$ [V] は 1 相分の供給電圧であり，$\dot{E}$ [V] は，回転する磁極によって誘導される電機子巻線 1 相分の起電力であ

（a） 発電機の回路

（b） 電動機の回路

図 3　同期発電機と同期電動機の等価回路

る。電動機電流 $\dot{I}_M$ [A] の向きを図のように定めると，この回路では，同期電動機として，各電圧の間には，次の関係がなりたつ。

$$\dot{V}=\dot{E}+r_a\dot{I}_M+jx_s\dot{I}_M=\dot{E}+(r_a+jx_s)\dot{I}_M \quad (2)$$

$$\text{ゆえに}\quad \dot{E}=\dot{V}-(r_a+jx_s)\dot{I}_M \quad (3)$$

問 2. 図3(a)で，$\dot{E}$ [V]，$\dot{I}_G$ [A] 間の電力と，$\dot{V}$ [V]，$\dot{I}_G$ [A] 間の電力とでは，どちらが大きいか。また，図(b)で，$\dot{E}$ [V]，$\dot{I}_M$ [A] 間の電力と，$\dot{V}$ [V]，$\dot{I}_M$ [A] 間の電力とでは，どちらが大きいか。

（3） 電機子反作用

図4(a)は，三相同期電動機1相分の等価回路である。図の向きで電流 $\dot{I}_G$ [A] を考えると，$\dot{I}_M=-\dot{I}_G$ であり，$\dot{E}$ [V] に対し，$\frac{\pi}{2}$ [rad] の位相差をもつ場合のベクトル図は，図(b)，(c)となる。

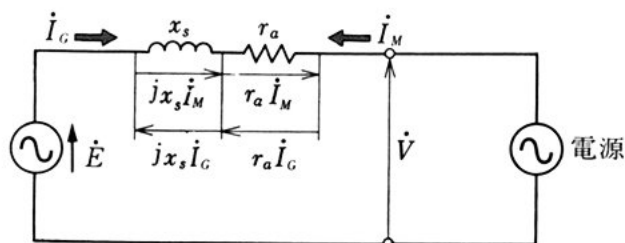
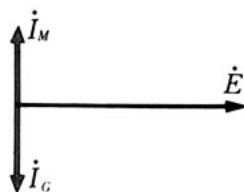
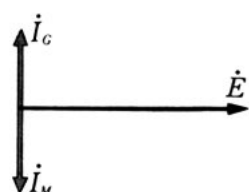
$\dot{E}$ [V] と $\dot{I}_G$ [A] は，図3(a)の同期発電機の回路と同じである。$\dot{E}$ [V] と $\dot{I}_G$ [A] の関係で，すでに学んだように，$\frac{\pi}{2}$ [rad] の遅れ電流による電機子反作用は減磁作用であり，$\frac{\pi}{2}$ [rad] の進み電流による電機子反作用は増磁作用であるから，図4(b)の関係では，電機子反作用は減磁作用として働き，図(c)の関係では増磁作用として働く。

(a) 三相同期電動機1相分の等価回路

(b) 減磁作用　　(c) 増磁作用

図 4　電機子反作用における減磁作用と増磁作用

ここで，電機子電流を $\dot{I}_M$ [A] で表せば，$\dot{E}$ [V]と $\dot{I}_M$ [A] の関係で，同期電動機における電機子反作用は，$\dot{E}$ [V] に対し，$\frac{\pi}{2}$ [rad] だけ進んだ電流によって減磁作用（図(b)）として働き，$\frac{\pi}{2}$ [rad] だ

け遅れた電流によって増磁作用（図(c)）として働く。また，$\dot{E}$ [V] に対し，同相の電流 $\dot{I}_M$ [A] による働きは，交さ磁化作用である。

これらの作用は，回路的にはリアクタンスであり，同期発電機の場合と同じように，漏れリアクタンスと併せて同期リアクタンスとよぶ。図3(b)と図4(a)の x_s [Ω] は同期リアクタンスである。

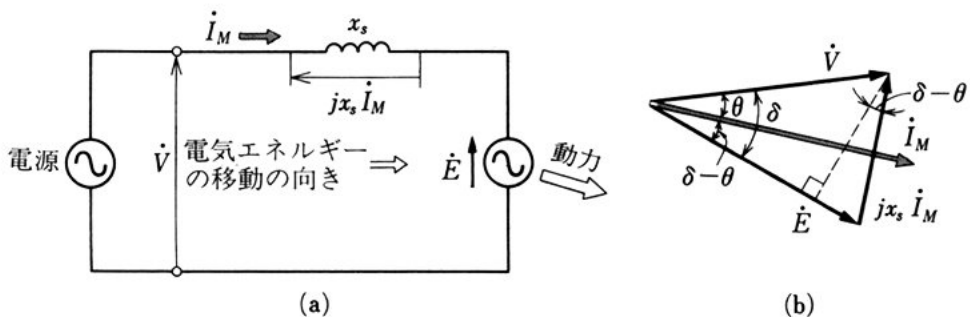
問 3. 電機子反作用について，同期発電機と同期電動機を比較せよ。

2. 三相同期電動機の特性

（1） 入力・出力・トルク

ふつう同期電動機では，電機子巻線の抵抗 r_a [Ω] は同期リアクタンス x_s [Ω] に比べてごく小さいので，r_a [Ω] を無視して考えると，三相同期電動機の1相分の等価回路は図5(a)となり，そのベクトル図は図(b)となる。ここで，δ [rad] は，$\dot{V}$ [V] に対する $\dot{E}$ [V] の位相差で負荷角であり，θ [rad] は，$\dot{V}$ [V] に対する $\dot{I}_M$ [A] の位相差である。

入　力　図5(b)のベクトル図からわかるように，電動機の力率は $\cos\theta$ であるから，三相同期電動機の1相分の入力 P_1 [W] は，次の式で表される。

図 5 同期電動機の等価回路とベクトル図

$$P_1 = VI_M \cos\theta \tag{4}$$

出　力　図5の $\dot{E}$ と $\dot{I}_M$ の関係は，ベクトル図では正の電力となるが，回路図ではその向きが互いに逆であるから，発生電力ではなく，消費電力すなわち，出力を表す。そこで，三相同期電動機1相分の出力 P [W] は，次の式で表される。

$$P = EI_M \cos(\delta - \theta) = \frac{VE}{x_s} \sin\delta \tag{5}$$

トルク　式(5)から，三相同期電動機の全出力は $3P$ [W] である。このときの電動機の同期速度を n_s [rpm] とすると，トルク T [N·m]は，次の式で表される。

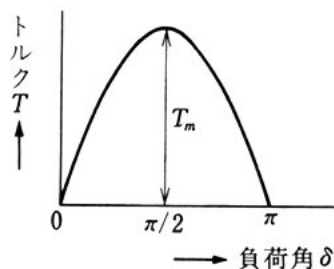
$$3P = 2\pi \frac{n_s}{60} T$$

ゆえに，
$$T = \frac{60}{2\pi n_s} \cdot 3P = \frac{60}{2\pi n_s} \cdot \frac{3VE}{x_s} \sin\delta \tag{6}$$

以上のことから，図6に示すように，負荷角 δ が大きくなるに従ってトルク T [N·m] は大きくなり，δ が $\frac{\pi}{2}$ [rad] のとき最大値 T_m [N·m] となる。負荷のトルクが T_m [N·m] より大きいと，さらに δ は増加し，トルクは減少して，電動機はついに停止する。これを**同期外れ**といい，同期外れをしない最大トルク T_m [N·m] を**脱出トルク**という。

図6　負荷角とトルク

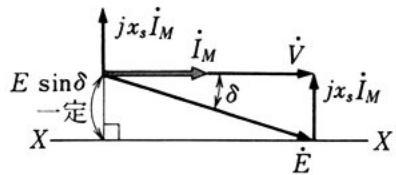
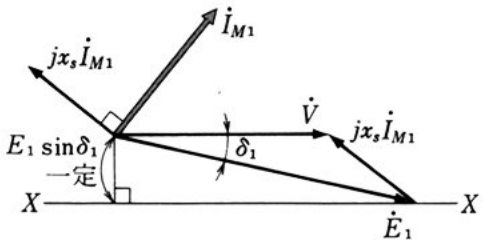
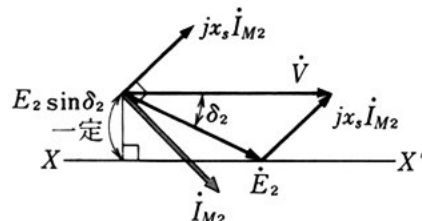
脱出トルクは，実際には δ が 50～60° の範囲にあって，電動機が定格周波数・定格電圧および常規の励磁において，運転を1分間継続できる最大トルクのことである。

同期電動機において，負荷が急変すると，負荷角 δ が変化し，新しい負荷角 δ' に落ち着こうとしても，回転子の慣性のために，負荷

角は δ' を中心として周期的に変動する。この現象を**乱調**といい，電源の起電力や周波数などが周期的に変動した場合にも生じる。乱調が激しくなると，電源との同期が外れて電動機は停止する。乱調を防ぐには，始動巻線も兼ねる制動巻線を設けたり，はずみ車を取り付けたりする。

問 4. 負荷が一定であるとき，図 5(b) から，$P=\dfrac{VE\sin\delta}{x_s}$ になることを証明せよ。

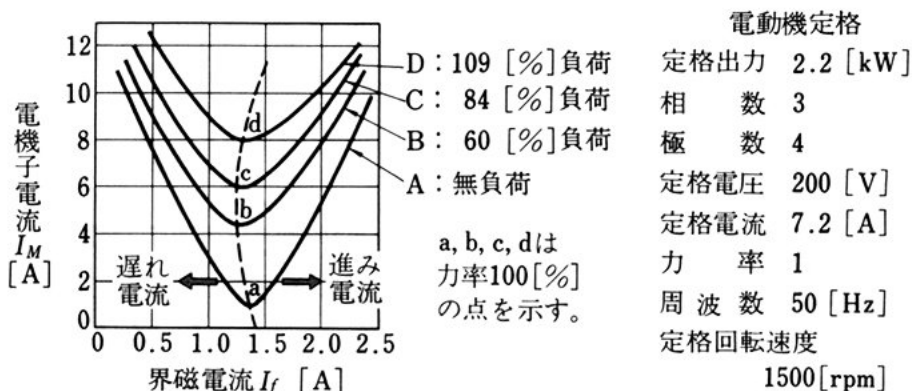
(2) 位 相 特 性

三相同期電動機が，供給電圧 $\dot{V}$ [V]，電機子電流 $\dot{I}_M$ [A]，力率 1 で運転している場合，ベクトル図は図 7(a) となる。ここで，x_s [Ω] を界磁電流 I_f [A] に無関係に一定と考えると，$\dot{V}$ [V] と電動機の 1 相分の出力 P [W] が一定であれば，式 (5) からわかるように，$E\sin\delta$ も一定となる。したがって，I_f [A] の変化によって増減する誘導起電力 $\dot{E}$ [V] のベクトルの先端は，XX' 上を移動することになる。そこで，界磁電流を図 (a) の状態から変化させた場合について考える。

図 7 一定負荷のときの位相特性

界磁電流 I_f の増加　I_f [A] を大きくすると，図(b)からわかるように，$\dot{E}$ [V] が大きくなり，$\dot{E}_1$ [V] となれば，δ [rad] が δ_1 [rad] まで減少し，$\dot{I}_M$ [A] の大きさが増して $\dot{V}$ [V] より位相が進んだ電流 $\dot{I}_{M1}$ [A] になる。

界磁電流 I_f の減少　I_f [A] を小さくすると，図(c)からわかるように，$\dot{E}$ [V] が小さくなり，$\dot{E}_2$ [V] となれば，δ [rad] が δ_2 [rad] まで増加し，$\dot{I}_M$ [A] の大きさが増して $\dot{V}$ [V] より位相が遅れた電流 $\dot{I}_{M2}$ [A] になる。

V 曲線　図7に示すように，三相同期電動機は，界磁電流を変えると，電機子電流の供給電圧に対する位相が変わり，さらに，電機子電流の大きさも変わる。そこで，電機子電流 I_M [A] を縦軸に，界磁電流 I_f [A] を横軸にとってグラフをかくと，図8に示すようにV形の曲線となる。これを同期電動機の**位相特性曲線**または**V 曲線**という。曲線Aは無負荷の場合，曲線B，C，Dはしだいに負荷を大きくする場合である。これらの曲線の最低点は力率が1に当たる点で，図の破線で示す部分の右側は進み電流，左側は遅れ電流の範囲となる。

図8　三相同期電動機のV曲線

例題 **1**. 端子電圧 V が 210 [V]，電機子電流 I_a が 10 [A]，力率 $\cos\theta$ が 100 [%] で運転している三相同期電動機がある。この電動機の 1 相の誘導起電力 E [V]，負荷角 δ，出力 $3P$ [kW] を求めよ。また，同一出力で界磁電流を 1.5 倍に増したときの，1 相の誘導起電力 E_1 [V]，電機子電流 I_{M1} [A]，力率 $\cos\theta_1$ を求めよ。ただし，電動機は Y 結線で，1 相の同期リアクタンス x_s は 7 [Ω] とし，電機子抵抗・損失・磁気飽和は無視する。

解答 図 7 (a)，(b) における諸量を計算し，ベクトル図 (図 9，10) をかいて求める。

1)　力率 $\cos\theta$ が 100 [%] の場合（図 9）

相電圧 $V=\dfrac{210}{\sqrt{3}}$ [V]

同期リアクタンス降下

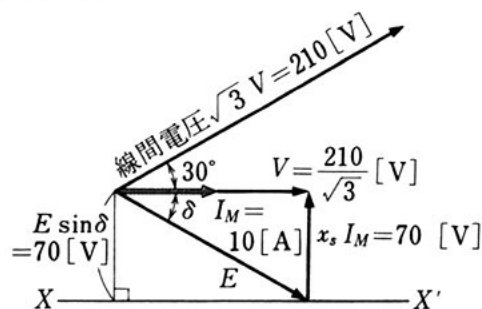
$x_s I_M = 7\times 10 = 70$ [V]

1 相の誘導起電力　$E=$

$\sqrt{\left(\dfrac{210}{\sqrt{3}}\right)^2+70^2}=140$ [V]

負荷角　$\delta=\sin^{-1}\dfrac{70}{140}=30°$

図 9

出　力 $3P=\dfrac{3VE\sin\delta}{x_s}=\dfrac{3\times\dfrac{210}{\sqrt{3}}\times 140\times\sin 30°}{7}=3.64$ [kW]

2)　界磁電流 1.5 倍の場合（図 10）

磁気飽和を無視すれば，誘導起電力は界磁電流に比例する。

1 相の誘導起電力　$E_1=$

$E\times 1.5=140\times 1.5=210$ [V]

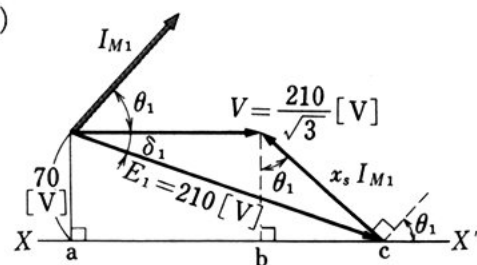



図 10

$\overline{\mathrm{bc}}=\overline{\mathrm{ac}}-\overline{\mathrm{ab}}=\sqrt{210^2-70^2}-\dfrac{210}{\sqrt{3}}=70\sqrt{8}-70\sqrt{3}=76.72$ [V]

電機子電流　$I_{M1}=\frac{x_s I_{M1}}{x_s}=\frac{\sqrt{70^2+76.72^2}}{7}=\frac{103.9}{7}=14.8\,[\mathrm{A}]$

力　率　$\cos\theta_1=\frac{70}{x_s I_{M1}}\times 100=\frac{70}{103.9}\times 100=67.4\,[\%]$

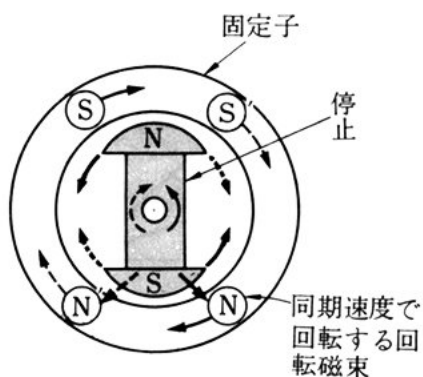
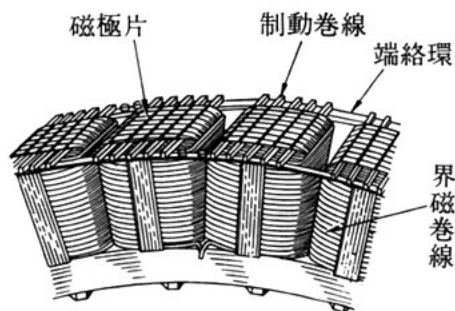
問 5． 界磁電流の増減と電機子電流の関係を説明せよ。

3．三相同期電動機の始動とその利用

(1) 始　動　法

図11(a)に示すように，回転子磁極が停止し，回転磁束がⓃ，Ⓢの状態になった瞬間を考えると，ⓈとN，ⓃとS間の吸引力によって，磁極は逆時計回りのトルクを受ける。ところが，回転磁束は速く回るが，回転子は慣性があるため，回転磁束に即応して回転できない。それで，例えば，回転磁束が回転してⓈ′，Ⓝ′のようになった瞬間には，磁極は破線で示すように，時計回りのトルクを受ける。このことから，回転子磁極が受ける平均のトルクは0となり，そのままでは始動できない。そこで始動のとき，次に示す方法で回転子を同期速度付近まで回転させる必要がある。

自己始動法　回転子の磁極面に，図11(b)に示す制動巻線を施

図 11　同期電動機の始動

(a) 自分自身では始動不能

(b) 制動巻線

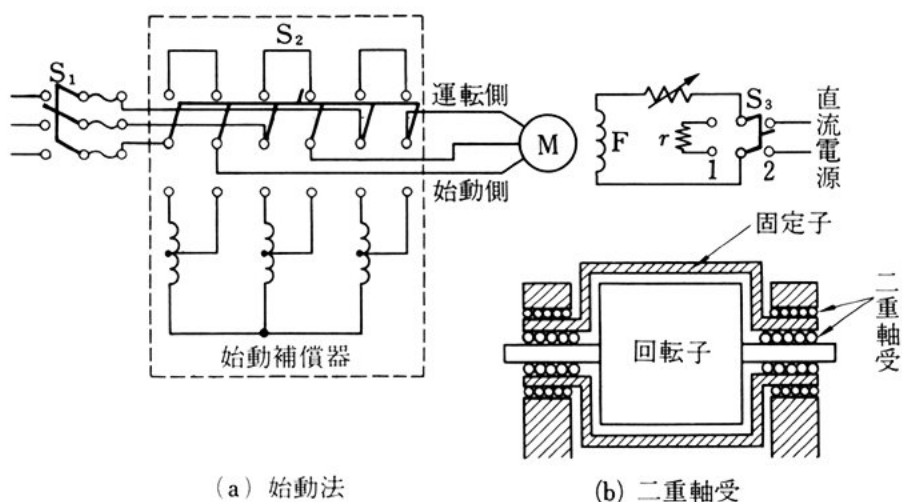



図 12 始　動　法

すと，これは三相誘導電動機におけるかご形回転子と同じになる。

図 12 (a) に示すように，S_3 を 1 側に閉じて，界磁巻線 F を r で短絡し，S_2 を始動側に閉じ，S_1 を閉じて，固定子巻線に三相交流電流を流すと，三相誘導電動機の原理によって始動する。

この場合，全電圧を加えると始動電流が大きくなるので，図 (a) に示す始動補償器などで，電圧を適当に下げておく。

回転子の回転速度が同期速度近くになったとき，S_3 を 2 側に切り換えて，界磁巻線の短絡を切り放し，直流電源で励磁すると，回転子は同期速度に引き込まれ，以後は同期速度で回転を続ける。そこで，S_2 を運転側に切り換え，全電圧を供給して運転状態にする。

超同期電動機法　図 12 (b) に示すように，二重軸受にして，回転子のほかに，固定子も回転できるようにすれば，次の方法で，大きな負荷をつないだ場合でも，始動が容易になる。

この装置で，電源電圧を固定子の電機子巻線に加えると，固定子の方が回転磁界と逆向きに回転する。固定子の回転速度が同期速度に近くなったとき励磁すると，以後は同期速度で回転を続ける。

次に，帯ブレーキで固定子に制動を与えると，回転子が負荷とともに回り始め，固定子を停止すると，ふつうの三相同期電動機になる。このような電動機は，**超同期電動機**とよばれる。

始動電動機法　始動用電動機として，誘導電動機や直流電動機を用い，これを直結した三相同期電動機を無負荷で運転する。加速後に励磁し，三相同期発電機として電源に並列に接続し，負荷分担を変えて三相同期電動機として働かせる。

問 6. 自己始動法で，磁極巻線を抵抗で短絡する理由を二つ挙げよ。

（2） 三相同期電動機の利用

三相同期電動機は，回転速度が同期速度で一定であり，力率をつねに1にすることも，任意の値にすることもできる利点がある。しかし，始動トルクが小さく，直流電源を必要とするなどの欠点もある。

これらの欠点はいろいろ工夫改善され，この電動機の利点を生かして，同期調相機・各種圧縮機・製紙用砕木機・送風機・プロペラポンプなどに用いられる。図13は，同期調相機の外観を示す。

同期調相機　図14(a)は，三相交流回路の1相分を示す。r, x [Ω]は，1相についての電線路の抵抗およびリアクタンスである。

発電機の界磁電流 I_f [A]を調整して，電源の起電力 $\dot{E}$ [V]を一定に保っても，図(b), (c)のベクトル図からわかるように，負荷端子電圧 $\dot{V}$ [V]は変化し，その大きさを一定に保つことはできない。

図13 同期調相機

負荷端子電圧を一定に保つために，次の方法がある。

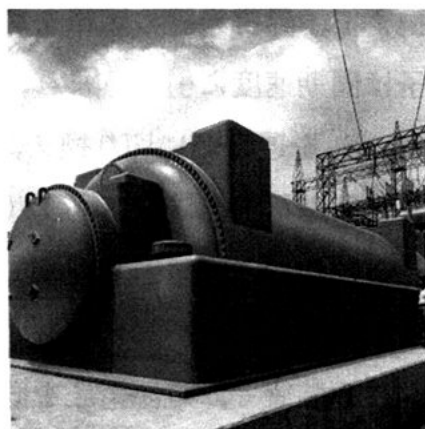
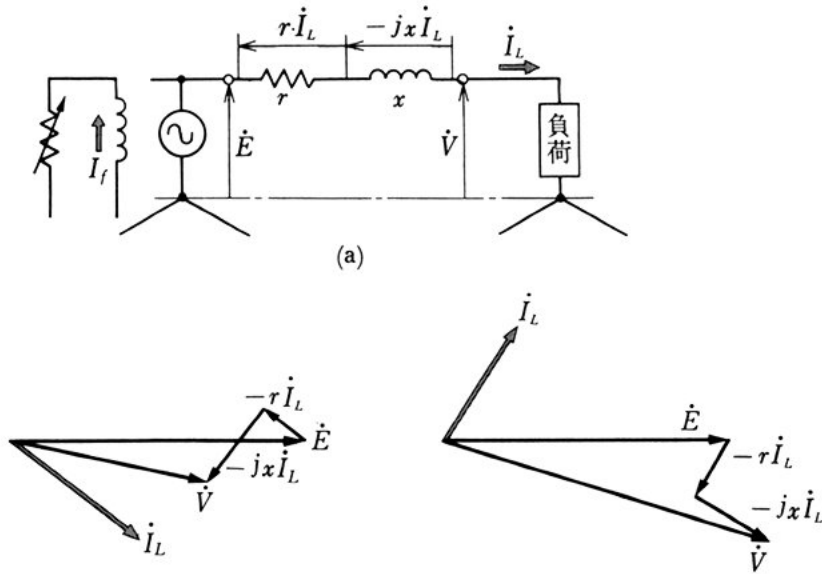
図14(b), (c)からわかるように，

(b) 図(a)のベクトル図（遅れ電流）　(c) 図(a)のベクトル図（進み電流）

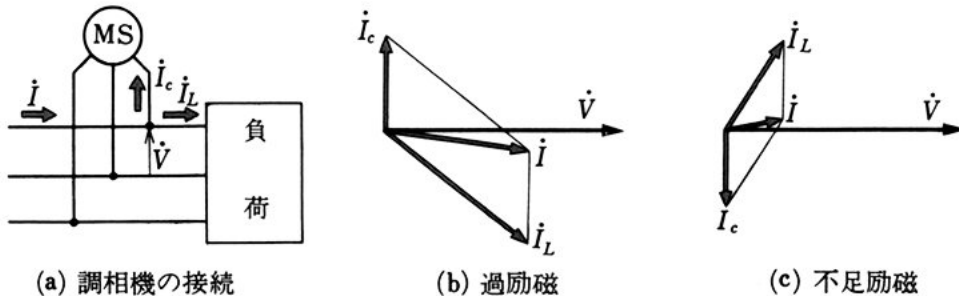
図 14　送電線の電圧降下

$\dot{E}$ [V] に対して遅れ電流が流れると，電線路の電圧降下により，$\dot{V}$ [V] は小さくなり，進み電流が流れると，$\dot{V}$ [V] は大きくなる。

そこで，図 15(a) に示すように，負荷と並列に三相同期電動機 MS を無負荷で接続して運転する。

5　負荷が誘導性の場合には，三相同期電動機 MS の界磁を過励磁にして，必要な進み電流 $\dot{I}_c$ [A] を流し，r [Ω] と x [Ω] における電圧降下を減少させ，負荷端子電圧 $\dot{V}$ [V] を一定にする。

また，負荷が容量性の場合には，三相同期電動機 MS の励磁を弱

図 15　同期調相機

(a) 調相機の接続　(b) 過励磁　(c) 不足励磁

めることによって，必要な遅れ電流 $\dot{I}_c$ [A] を流し，負荷端子電圧 $\dot{V}$ [V] を一定にする。

このような目的で用いる三相同期電動機は **同期調相機** とよばれる。

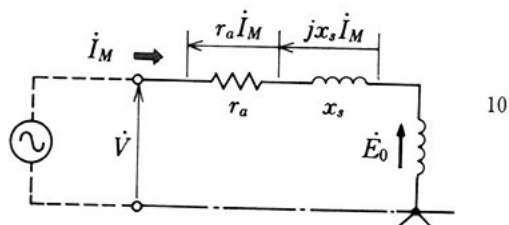
問 7. 送電線の電圧降下を，図 14 (b)，(c) から考えよ。

問　題

5

1. 2極，50 [Hz]の同期速度はいくらか。6極，60 [Hz] ではどうか。
2. 同期発電機と同期電動機は，構造的には同じであるが，どのような点で異なるか。図にかいて説明せよ。
3. 図 16 は，三相同期電動機1相分の等価回路である。電動機の励磁を調整して，その力率を 100 [%]，80 [%]（誘導性），80 [%]（容量性）にしたときの，$\dot{V}$, $\dot{E}_0$, $\dot{I}_M$, $jx_s\dot{I}_M$, $r_a\dot{I}_M$ のベクトル図をかけ。

図 16

10

4. 図 17 は，三相同期電動機の1相分の等価回路で，電機子抵抗は無視してある。供給電圧 $\dot{V}=200\,\varepsilon^{j0}$ [V]，電機子電流 $\dot{I}_M=10\,\varepsilon^{j0}$ [A]，$x_s=7$ [Ω] のとき，誘導起電力 $\dot{E}_0$ を求めよ。また，負荷角 δ はいくらか。

15

図 17

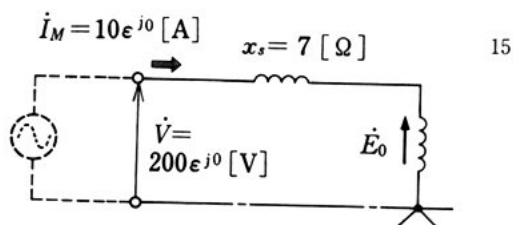
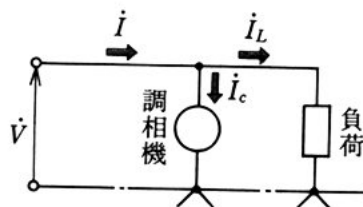
20

5. 図 18 は，負荷と並列に同期調相機を運転するときの1相分の回路図である。負荷力率が 80 [%]（誘導性）のとき，総合力率を 100 [%] にするベクトル図をかけ。

図 18

25

電動機の応用

この節の目標　電動機は，家庭用電気機器にも広く用いられているが，工場・事務所などには，小形のものから大規模のものまで広く用いられている。ここでは，その例について調べる。

1. 電動機の利用

(1) 電動機の選定

電動機を動力用として使用する場合，どのような種類の電動機を用いるかを決めるには，一般に，次のことを考えなければならない。

1) 負荷に最も適した速度-トルク特性をもっていること。

2) 温度上昇および使用場所に関連して，適当な定格・通風およ

表 1 電動機の種類別による特性と負荷

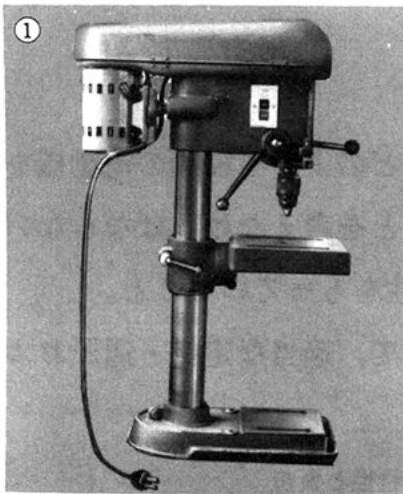
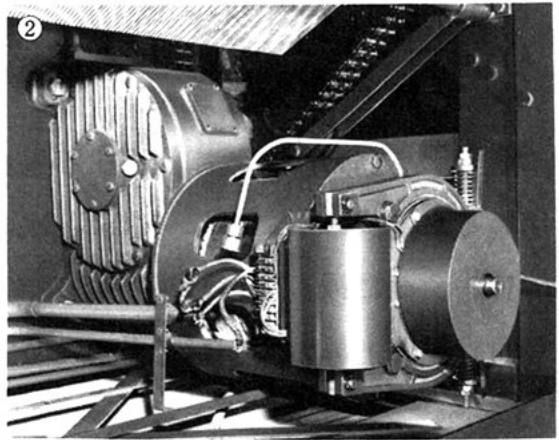
電気方式		電動機の種類	速度特性	始動トルク/全負荷トルク	負荷の例
直流		分巻	定速度・速度制御可能	3	エレベータ・ポンプ・工作機械
		直巻	変速度	3.5	電車・巻上機・クレーン
		複巻	定速度・変速度	3.5	ポンプ・空気圧縮機
交流	三相	かご形誘導	定速度・多段変速	1～2	工作機械・ポンプ・送風機
		巻線形誘導	定速度	2～3	巻上機・クレーン・エレベータ
		同期	定速度	0	送風機・圧縮機・ポンプ
		シュラーゲ	定速度・速度制御可能	2.5	印刷機・リフト・ポンプ
	単相	誘導	定速度	0.4～5	扇風機・洗濯機・井戸ポンプ
		直巻整流子	変速度	2.5	電気ドリル・ミキサ・ミシン

び冷却方式のものであること。

3) 使用場所に応じた構造，保護形式のものであること。

4) 負荷を考慮した連結方式・制御方式のものであること。

このほか，設備費や保守の費用など経済的な条件を考慮することや，信頼性が高く，互換性に富む標準形の電動機を選ぶようにすることなど，細部にわたって検討しなければならない。

表1は，各種電動機の特性と，負荷の例を示している。

① ボール盤（単相誘導電動機使用）

② エスカレータの動力（三相誘導電動機使用）

③ 電気そうじ機（単相直巻整流子電動機使用）

図 1

問 1. 図1①，②，③は，家庭・学校・百貨店などで，よく用いられている電動機の例である。電動機の選定のしたかについて，上記の1）～4）について考えてみよ。

（2） 負荷と電動機のトルク

電動機が負荷の機械を運転するのに必要なトルクは，次の力などを考慮して決められる。

1） 主として負荷の目的である作業に必要な力

2） 負荷の機械の動く部分に対する回転力と，その周囲の空気の抵抗力

3） 電動機の軸と軸受の間の摩擦による抵抗力

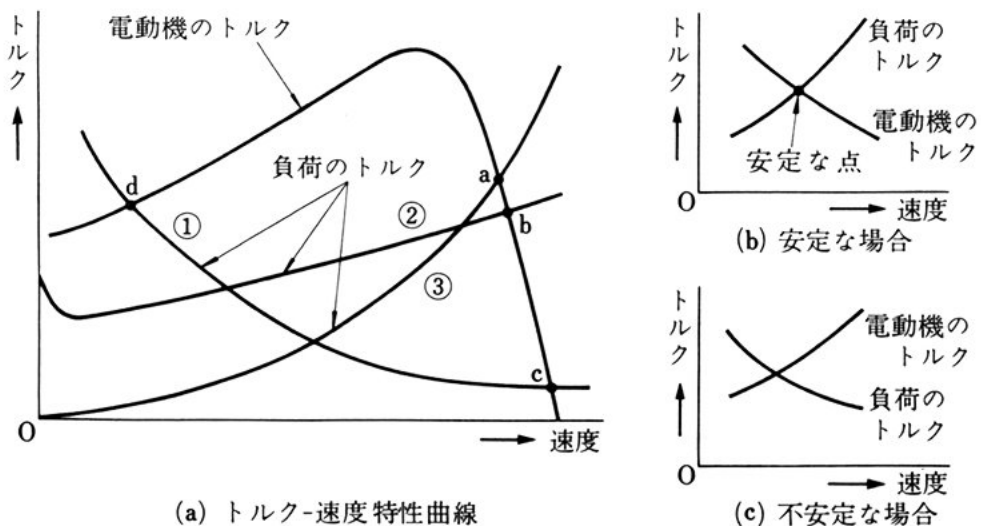
これらは一般に，速度に対するトルクの変化で表される。負荷が要求するトルク - 速度特性と，電動機のトルク - 速度特性の関係は，電動機を選ぶ場合の基本的な問題である。

図 2 (a) は，電動機と負荷のトルク - 速度特性で，① は巻取機，定切削工作機械，② はコンベヤ，巻上機，③ はポンプ，ファンなどの負荷に見られるトルク - 速度特性曲線の例である。

図 (b) では，電動機の回転速度が上昇すると，負荷の要求するトルクは大きくなり，負荷が大きくなって，電動機の回転速度は減少する。また，電動機の回転速度が減少すると，負荷が小さくなるから，

図 2 負荷と電動機のトルク - 速度特性

(a) トルク-速度特性曲線

(c) 不安定な場合

加速されてもとの回転速度に落ち着く。したがって，図(b)の両曲線の交点は，電動機が安定な運転を行う点である。図(c)の両曲線の交点では，電動機の運転は不安定となる。

電動機が安定な運転を続けるためには，図(b)に示す関係が必要である。

問 2. 図2(a)で，点dでは，電動機の運転は安定か不安定か。

2. 所　要　動　力

電動機は，クレーン・巻上機・コンベアなどの荷物を運搬する機械や，工作機械・粉粋機・ポンプ・圧縮機・送風機などの生産機械に使用されるが，所要動力の計算式は，使用目的によって異なる。

一例として，クレーンとポンプの場合の所要動力(電動機の出力)の計算式を示す。

(1) クレーンの場合

巻上用電動機の出力 P_1 [kW]，横行用電動機の出力 P_2 [kW]，走行用電動機の出力 P_3 [kW] は，それぞれ次の式で計算される。

$$P_1=\frac{w_1 v_1}{6.12}\cdot\frac{100}{\eta_1} \qquad (1)$$

w_1：巻上荷重 [tf]*，v_1：巻上速度 [m/min]，η_1：巻上装置全効率(通常 67～80 [%])

$$P_2=\frac{r_2 w_2 v_2}{6120}\cdot\frac{100}{\eta_2} \qquad (2)$$

w_2：w_1＋トロリー自重 [tf]，v_2：横行速度 [m/min]，r_2：走行抵抗 [kgf/tf]，η_2：横行装置の機械効率（通常 57～80 [%])

* 1重量トン [tf] は，質量1トン [t]（$=10^3$ [kg]）の物体に働く重力の大きさである。1 [tf]$=10^3$ [kgf]$=9.8\times10^3$ [N]

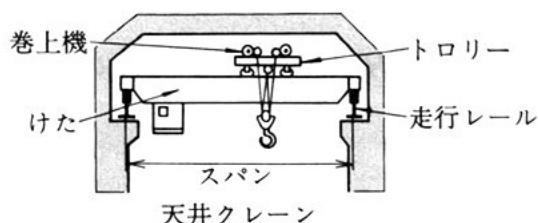
$$P_3 = \frac{r_3 w_3 v_3}{6120} \cdot \frac{100}{\eta_3} \qquad (3)$$

w_3: w_2＋けた重量 [tf], v_3: 走行速度 [m/min], r_3: 走行抵抗 [kgf/tf], η_3: 走行装置の機械効率（通常 67〜75 [%]）

問 3. $w_1=10$ [tf], $v_1=8$ [m/min] として，巻上用電動機の出力を求めよ。ただし，巻上装置全効率 η_1 は 70 [%] とする。

表 2 は，天井クレーンの標準を示したもので，これから必要な電動機の出力などを求めることもできる。

表 2　天井クレーン標準表

天井クレーン

定格荷重 [tf]	スパン [m]	速度[m/min]×電動機[kW]		
		巻上用	横行用	走行用
3	6〜14 15〜24	13×10	40×2	110×7.5 90×7.5
5	6〜14 15〜24	12×15	40×2	110×10 90×10
7.5	8〜14 15〜24	10×20	40×3	110×15 90×15
10	8〜14 15〜24	8×20	40×3	110×15 90×15

(2) ポンプの場合

電動機の出力 P [kW] は，次の式で計算される。

$$P = \frac{\alpha QH}{6.12} \cdot \frac{100}{\eta_P} \qquad (4)$$

Q: 揚水量 [m^3/min], H: 全揚程 [m],

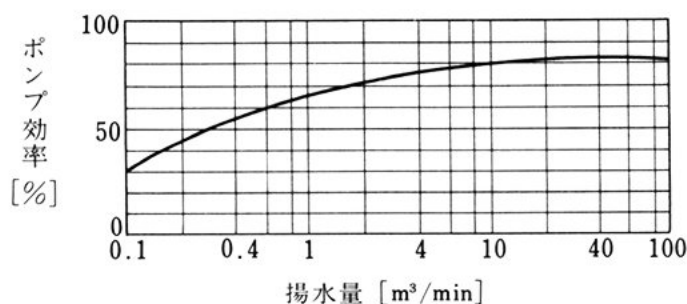



図3　ポンプ効率

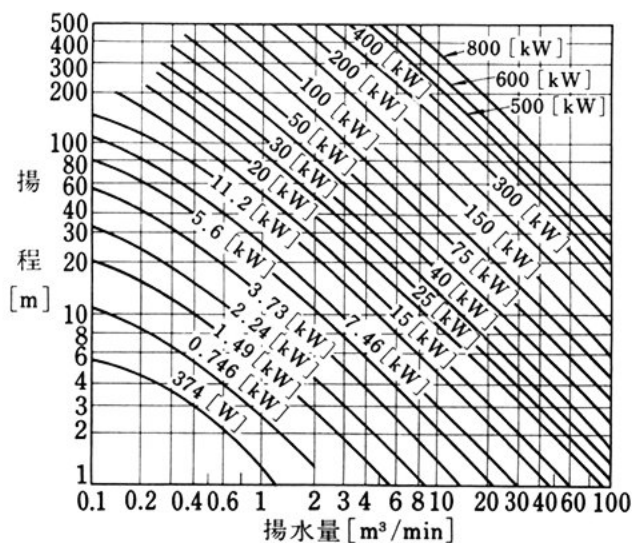
η_P: ポンプ効率 [%] (図3から求める),

α: ポンプの設計・工作上の誤差を見込んで，余裕をもたせる係数 (通常 1.1〜1.2)

問 4.　$Q=4$ [m³/min], $H=10$ [m], $\alpha=1.1$ の場合，電動機の出力を求めよ。

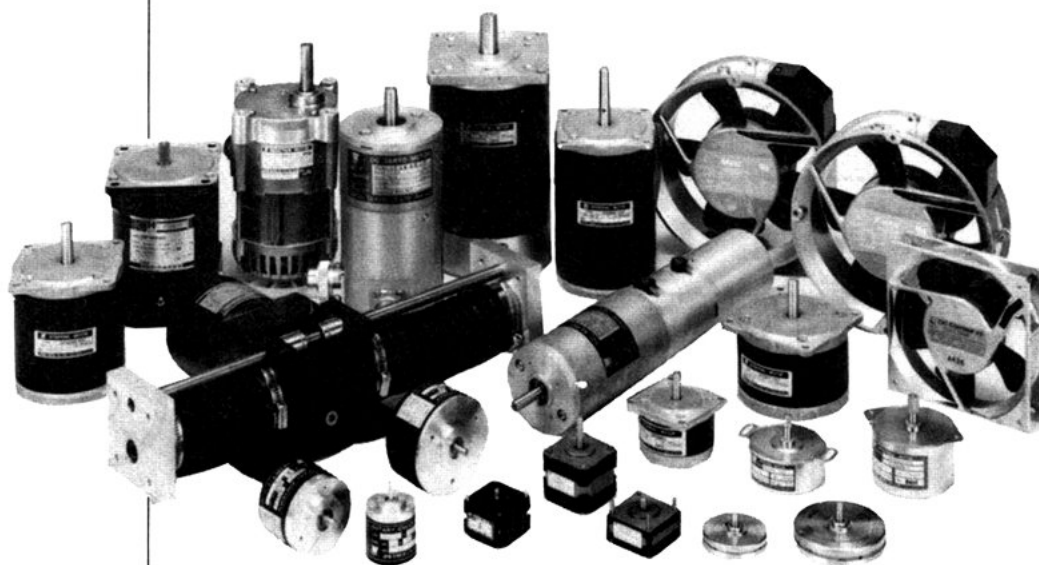
5

図4は，上の式で計算し，150 [%] の余裕をもたせたポンプの場合の所要動力を求める図表である。

図 4　揚水量と揚程から所要動力を求める図表

第6章

小形電動機

　出力 100 W 以下程度の電動機は，小形電動機とよばれる。小形電動機には，家庭用のせん風機など単純な動力用として用いられるものもあるが，制御を目的として作られたものが多くなっている。この種のものは，制御用小形電動機とよばれ，産業用ロボット，コンピュータ周辺機器など各種の制御用機器に広く利用されている。

　この章では，小形電動機のうち，制御用小形電動機の代表的なものについて調べる。

いろいろな小形電動機

1.　永久磁石形直流電動機

(1)　永久磁石形直流電動機

小形直流電動機の多くは，固定子に永久磁石が用いられているので，**永久磁石形直流電動機**または単に**直流電動機**とよばれる。

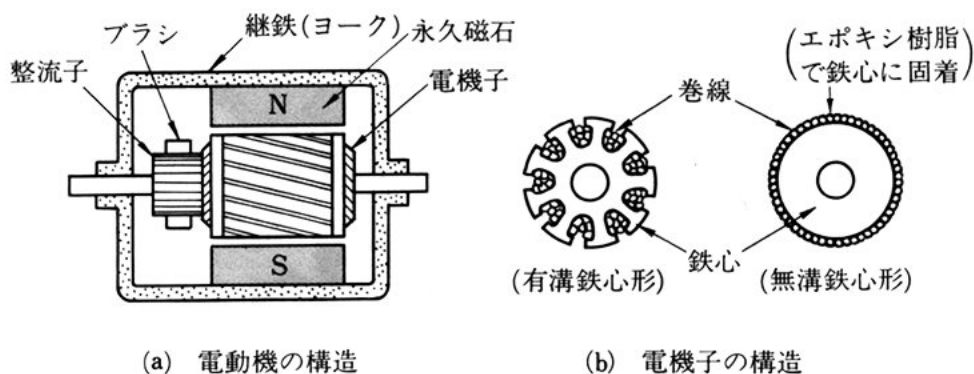
永久磁石は，その製造技術の進歩により，小形でしかも強力なものが作られ，電動機を小形にすることができるようになった。永久磁石材料としては，鋳造磁石のアルニコ(高 B_r，低 H_c*)，比較的安価な焼結磁石のフェライト(高 H_c，低 B_r)，高価だが特性のよい希土類磁石のサマリウム-コバルト（高 B_r，高 H_c）が用いられる。

図1は，永久磁石形直流電動機の構造の例である。電機子鉄心には，図(b)に示すように有溝鉄心形と無溝鉄心形とがある。

有溝鉄心形の電機子では，巻線はスロットの中に巻き込まれるので，その構造は非常に丈夫である。しかし，電機子鉄心が突極構造になるため，回転むらを起こしやすいという欠点がある。

無溝鉄心形の電機子は，円筒形の成層鉄心の上に巻線を固着させたものである。鉄心には突極がないので，回転むらや脈動トルクが

図1　永久磁石形直流電動機

(a)　電動機の構造　　(b)　電機子の構造

*　H_c は B-H 曲線上で求められる保磁力，B_r は残留磁気である。

生じない。しかし，この構造では，界磁と回転子鉄心との間のすきまが大きくなるので，強い永久磁石が必要になる。

（2）　コアレス直流電動機

電機子に鉄心のある永久磁石形直流電動機は，慣性モーメントが大きく，始動・停止，正逆転を頻繁に繰り返す用途には向かない。そこで，回転子の質量を減らすため，鉄心を用いない**コアレス直流電動機**が開発された。

図2は，カップ形コアレス直流電動機の構造の例である。電機子巻線は，カップ状に巻かれ，巻線をエポキシ樹脂とガラス繊維でしっかり固めた構造になっている。

電機子巻線には，図2に示すカップ形のほかに，円板状のディスク形がある。ディスク形の一例としては，図3に示す**プリント配線モータ**がある。

コアレス直流電動機には次に示す特徴がある。

1)　鉄心がないので回転子の慣性モーメントが小さい。

2)　有溝鉄心形にあったような回転むらが生じない。

3)　無鉄心のため巻線の自己インダクタンスが小さく，整流作用が優れている。

図2　カップ形コアレス直流電動機

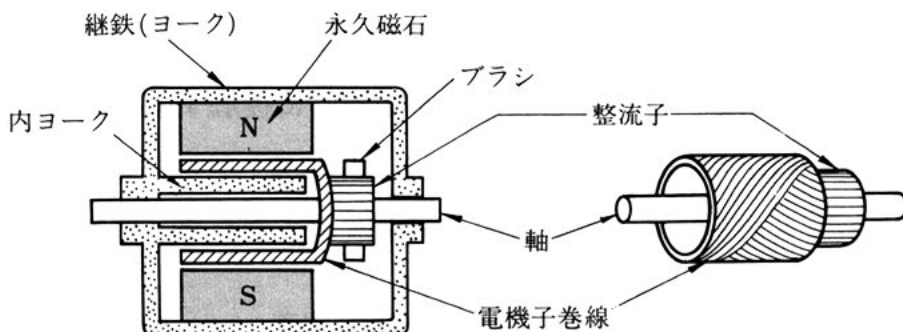
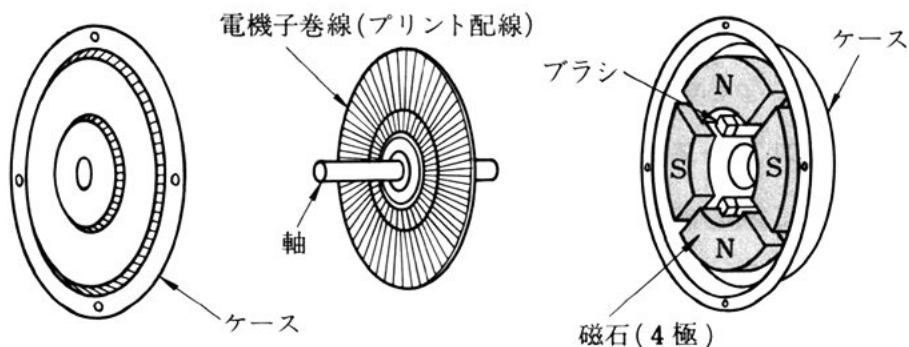



図 3　プリント配線モータ

(3)　永久磁石形直流電動機の特性

永久磁石形直流電動機に一定の電圧を加えた場合，トルク-速度特性は，図4に示すように，回転速度の増加とともにトルクが直線的に下降する。また，その傾きは，電機子電圧に無関係に一定である。このような特性は，回転速度や位置決めなどの制御には都合がよい。

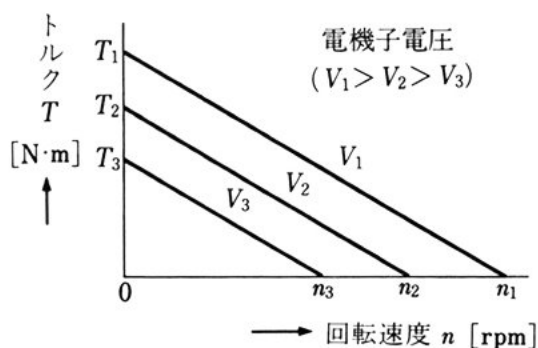



図 4　永久磁石形直流電動機のトルク-速度特性

2.　ブラシレス直流電動機

これまでに調べたような永久磁石形直流電動機は，制御性に優れた電動機であるが，ブラシと整流子が機械的に接触するため，ブラシや整流子面が摩耗したり，火花による**電気雑音***が発生したりするという短所もある。そこで，この欠点を改善するため，機械的な整

* 火花放電によって発生するパルス状の高周波雑音。

流の機構を電子的な機構に置き換えた。これが**ブラシレス直流電動機**である。この電動機には，磁束の向きや磁束密度に応じた電圧が発生するホール素子とよばれるものが用いられ，その働きによって，回転子の磁極の位置検出がなされる。

5 **（1） ホール素子**

ホール素子は，p形またはn形半導体のものがあり，外形は5［mm］角，厚さ数［mm］のものである。

図5はホール素子の働きの原理図である。端子a，b間に電流を流し，電流が流れる面に直角に磁束を加えると，磁束と電流の両方に直角な方向，すなわちc，d間に起電力が生じる。これを**ホール効果**という。そのため，図5の荷電粒子（正孔）の流れ，すなわち電流 I［A］は，フレミングの左手の法則による方向の力を受け，端子cの方向に偏って流れる。端子c，d間に生じた電位差 V_H［V］は**ホール電圧**とよばれる。

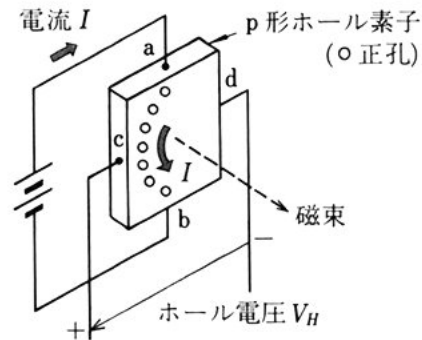
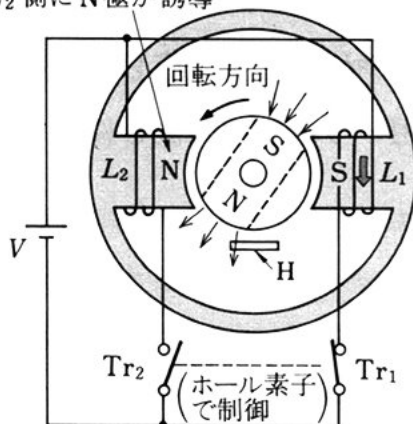
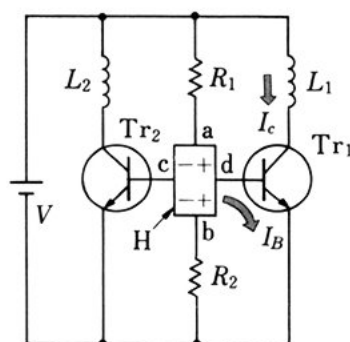



図5 ホール効果の原理

（2） ブラシレス直流電動機の動作

図6(a)は，ブラシレス直流電動機の回転原理の説明図であり，図(b)はその回路図である。図(a)において，回転子のN極の磁束は，その一部がホール素子に加わっている。これによって，図(b)のホール素子Hの端子c，d間にホール電圧 V_H［V］が発生する。V_H［V］の正の向きが端子dであるから，Tr_1 にベース電流が流れ，Tr_1 は導通する。コイル L_1 に電流が流れ，L_1 の突極がS極になるように励磁される。L_1 の磁極は，回転子のS極を反発させ，回転子を矢印の向きに回転させる。次に，図(c)に示すように，回転子のN極がホー

(a)　L_1励磁でS極が発生

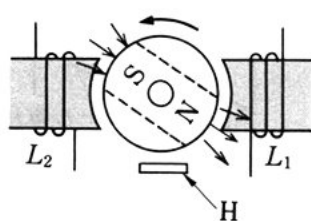
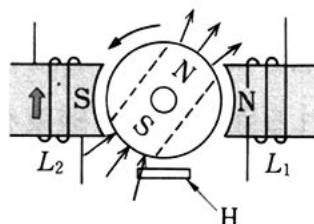
(b)　Tr_1導通でL_1が励磁

(c)　L_1, L_2ともに無励磁

(d)　L_2励磁でS極が発生

図 6　ホール素子を用いたブラシレス直流電動機

ル素子を通り過ぎると，ホール電圧は0［V］になり，Tr_1は不導通となり，L_1は励磁されない。ここで，S極どうしの反発力はなくなるが，回転子は慣性のためにそのまま回転を続け，図(d)に示すように，ホール素子には回転子のS極が近づく。今度は，V_H［V］の正の向きが端子cになるので，Tr_2が導通し，巻線L_2が励磁される。このときL_2の突極にはS極が発生し，回転子のS極と反発して回転を続ける。

この2極の電動機は，ホール素子が無励磁(死点)になる所が2か所あり，その位置に回転子があると，電動機は始動できない。そこで，実用のブラシレス直流電動機では，死点解消のため，ホール素子を2個または3個に増やし，固定子の励磁巻線も多相にしている。

ブラシレス直流電動機の特徴は，永久磁石形直流電動機の長所はそのままずべて備えており，機械的接触部分が無くなったことにより，電気雑音は発生せず，寿命も長くなる。このように，ブラシレス化によって電動機としての性能は向上するが，その反面，駆動用の制御回路が必要なので，高価になる。

3. パルスモータ

パルスモータは，ステッピングモータともよばれ，パルス電圧で回転子を駆動する電動機である。パルスが送られるたびに，定められた角度を1ステップとして回転する。この回転角 $\theta°$ を**ステップ角**という。

ステップ角 $\theta°$ のパルスモータの回転子が1回転するのに要するパルス数を S [step/rev] とすれば，S と θ の間には次の関係がある。

$$S=\frac{360}{\theta} \quad (1)$$

したがって，ステップ角 $\theta°$ の電動機に繰り返し周波数 f [pps]* のパルス電圧を加えて駆動すれば，電動機の回転速度 n [rpm] は，次の式で示される。

$$n=\frac{60\times f}{S} \quad (2)$$

いま，ステップ角 θ が 1.8° のパルスモータがある。この電動機を繰り返し周波数 1500 [pps] のパルス電圧で駆動するとき，電動機の回転速度 n [rpm] は，式（1），（2）を用いて次のようにして求める。

---

* pps は pulse per second（パルス/秒）の略である。

$$S=\frac{360}{\theta}=\frac{360}{1.8}=200 \quad [\text{step/rev}]$$

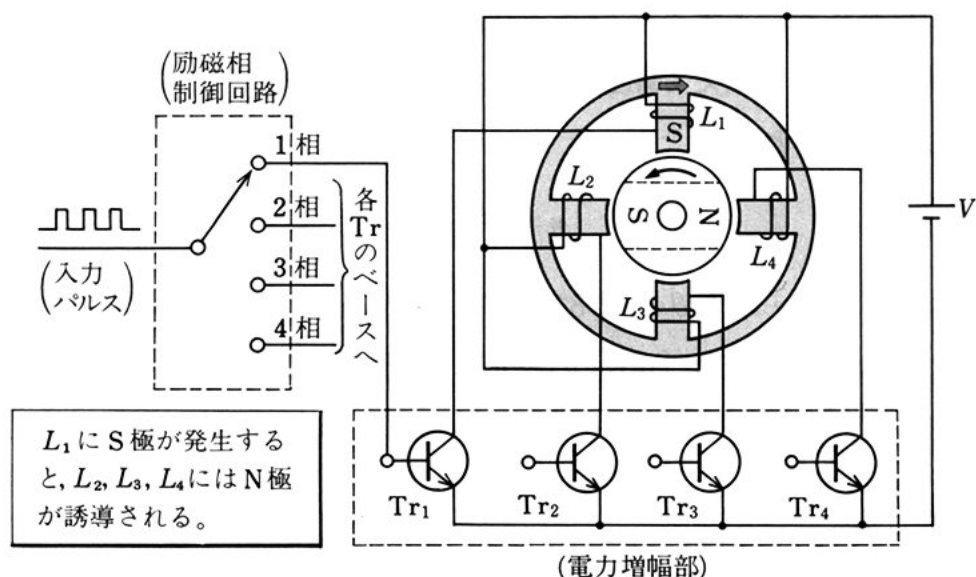
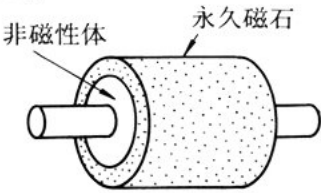
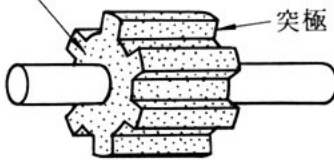
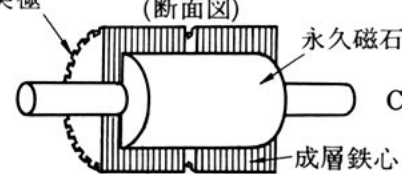
ゆえに，
$$n=\frac{60\times f}{S}=\frac{60\times1500}{200}=450 \quad [\text{rpm}]$$

となる。

（1）　パルスモータの原理

図7は，パルスモータの原理図である。固定子には90°ずつ離れた4個の突極があり，それに励磁巻線が設けてある。回転子は円筒形をした2極の永久磁石である。トランジスタ Tr は，パルス信号によって，オン・オフのスイッチング動作をする。励磁相制御回路は，入力パルスがくるたびに，順次各相にパルスを送り出す回路である。

いま，1相目からパルスが Tr_1 のベースに送られると，Tr_1 がオンとなり，巻線 L_1 には，矢印の向きに励磁電流が流れる。L_1 の突極にはS極が発生し，回転子のN極を吸引する。回転子は1パルスで90°回転する。次に，パルスが2相目から Tr_2 のベースに送られ

図 7　パルスモータの動作原理

ると，Tr_2がオンとなり，巻線L_2が励磁される。L_2の突極にS極が発生し，回転子のN極を吸引し，90°回転する。このように，3相目，4相目と順にパルスが送られ，そのたびに回転子は90°ずつ回転する。したがって，このパルスモータのステップ角θは90°である。

以上のように，パルスモータを駆動させるには，図7に示すように，入力パルス，励磁相制御回路，巻線を励磁する電力増幅部が必要になる。

（2） 各種のパルスモータ

表1 パルスモータの種類

種類	回転子の構造	特徴
永久磁石形	PM形 非磁性体　永久磁石 A	無励磁でも保持力が働き，回転軸を拘束する力がある。安価である。アルニコ磁石のステップ角は45°か90°で，フェライト磁石は多極着磁により，7.5°や15°のものが多い。
可変リラクタンス形	VR形 高透磁率（磁石材料）鉄心 突極 B	励磁電流によって生じる駆動トルクは大きいが，無励磁では保持力が働かない。 ステップ角は一般に15°が多い。
ハイブリッド形	PM形とVR形を一体構造化したもの 突極　(断面図)　永久磁石 成層鉄心 C	駆動トルクが大きく，始動特性・停止特性が優れている。 無励磁での保持トルクがあり，微少ステップ（1°以下）のものを作ることができるので，高精度用として使われる。

実用化されているパルスモータには，回転子の構造によって永久磁石形(PM形)，可変リラクタンス形(VR形)，ハイブリッド形(HB形)の3種類がある。各種のパルスモータの回転子の構造および特徴を表1に示す。

パルスモータの一般的な特徴を次にまとめる。

1) 電動機の回転角は入力パルス数に比例し，回転速度はパルス周波数に比例する。これにより，位置決め制御や速度制御に適する。

2) 起動・停止，正転・逆転の駆動に適する。

3) 負荷トルクが大きいと，起動や停止のとき，入力パルスに応答できず，同期電動機と同じ**同期外れ**が起きることがある。

4. 小形交流電動機

交流電動機には，整流子形と回転磁界形がある。整流子形には交流整流子電動機がある。**回転磁界形電動機**は，固定子巻線に交流を流し，そこに発生する回転磁界と回転子導体に生じる誘導電流との間に働くトルクを利用したものである。回転磁界形電動機には，回転子が回転磁界の同期速度で回転する**同期電動機**と，同期速度より遅れる**非同期電動機**とがある。それぞれの電動機は，回転子の構造によって表2のように分類される。

ここでは，永久磁石形同期電動機，ヒステリシス同期電動機，塊状鉄心誘導電動機，ドラグカップモータについて学ぶ。

(1) 永久磁石形同期電動機

図8に示すように永久磁石形同期電動機は，固定子巻線によって回転磁界を作り，永久磁石で構成された回転子を回転させるもので

表 2 各種回転磁界形電動機とその用途

	名 称	特 徴 ・ 用 途
同期電動機	巻線界磁同期電動機	三相同期電動機
	永久磁石形同期電動機	交流サーボモータ用，産業用ロボット
	リラクタンス同期電動機	音響・計測器の定速度回転用
	ヒステリシス同期電動機	事務器・記録計などの定速度回転用
非同期電動機	かご形誘導電動機	三相誘導電動機・単相誘導電動機・二相サーボモータ，交流サーボモータ用
	巻線形誘導電動機	三相誘導電動機
	表面導体誘導電動機	回転むらがない，音響機器の直結駆動
	塊状鉄心誘導電動機	回転むらがない，二相サーボモータ
	ドラグカップモータ	慣性が小さい，二相サーボモータ

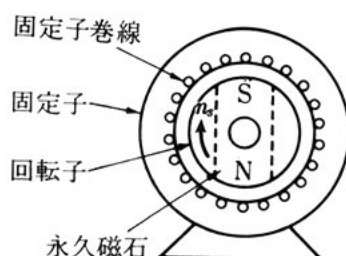



図 8 永久磁石形同期電動機

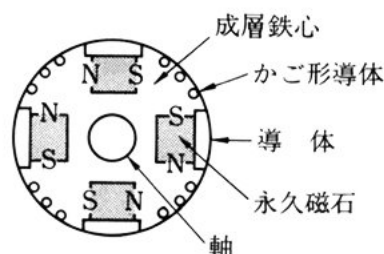



図 9 永久磁石形同期電動機の回転子の構造例

ある。回転子は同期速度で回転する。

ところで，回転子が永久磁石の場合は，回転磁界を加えても始動トルクは発生しない。そこで，回転子に図9に示すかご形構造の導体を取り入れ，始動時は誘導電動機として起動させる。

5 **(2) ヒステリシス同期電動機**

この電動機の回転子は，ヒステリシス損の大きな磁性鋼を図10に示すように円筒状にした構造である。磁性鋼の回転子は，回転磁界が加わると磁性材に渦電流が流れ，回転子に渦電流によるトルクが，

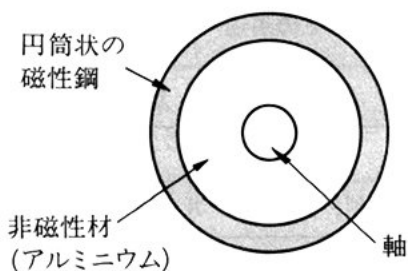



図 10　ヒステリシス同期電動機の回転子

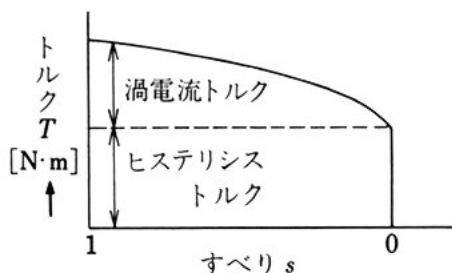



図 11　トルク－すべり特性

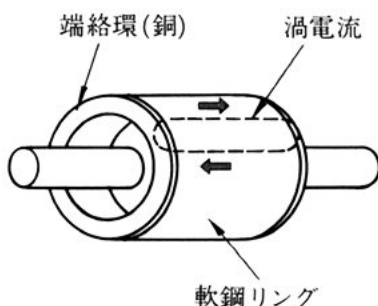



図 12　塊状鉄心誘導電動機の回転子

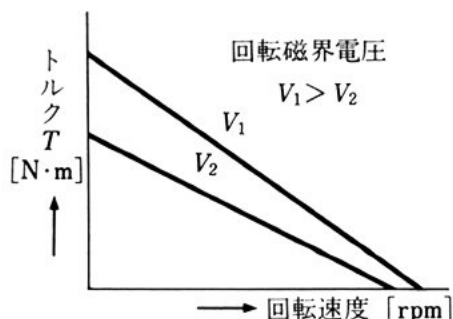



図 13　トルク－速度特性

図 11 に示すように発生する。速度が速くなると，回転子は回転磁界によって磁化されたようになり，回転磁界の同期速度で回転する。

この電動機の特徴は，回転子に突極がないので回転むらが生じないことと，自己始動ができ，始動トルクが大きなことである。

(3)　塊状鉄心誘導電動機

この電動機は図 12 に示すように，軟鋼を円筒状にした回転子を用いる誘導電動機である。軟鋼リングは，回転磁界によって渦電流が流れ，この電流と回転磁界の間に発生するトルクで回転する。回転子の軟鋼は，電気抵抗が大きいので，トルク－速度特性は，図 13 に示すように，回転速度の上昇とともにトルクが低減する。

この電動機は，このような特性があり，回転むらも生じないことから，制御用交流電動機として用いられる。

(4)　ドラグカップモータ

この電動機は回転子の慣性をとくに小さくするため，図 14 に示すように，回転子鉄心をもたない構造になっている。回転子は，導体に銅またはりん青銅を用い，カップ状の構造になっている。この電動機は回転子導体の電気抵抗が大きく，回転速度の上昇とともにトルクが低減する特性があり，また慣性が小さいため，応答性がよい制御用電動機である。

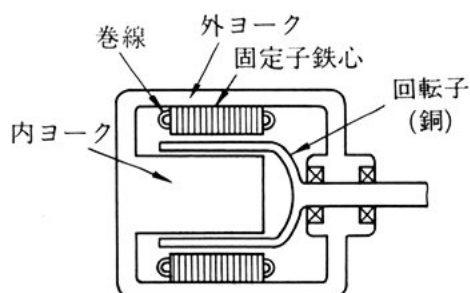



図 14　ドラグカップモータ

5.　サーボモータ

サーボ機構の制御対象として用いられる電動機は，サーボモータとよばれる。

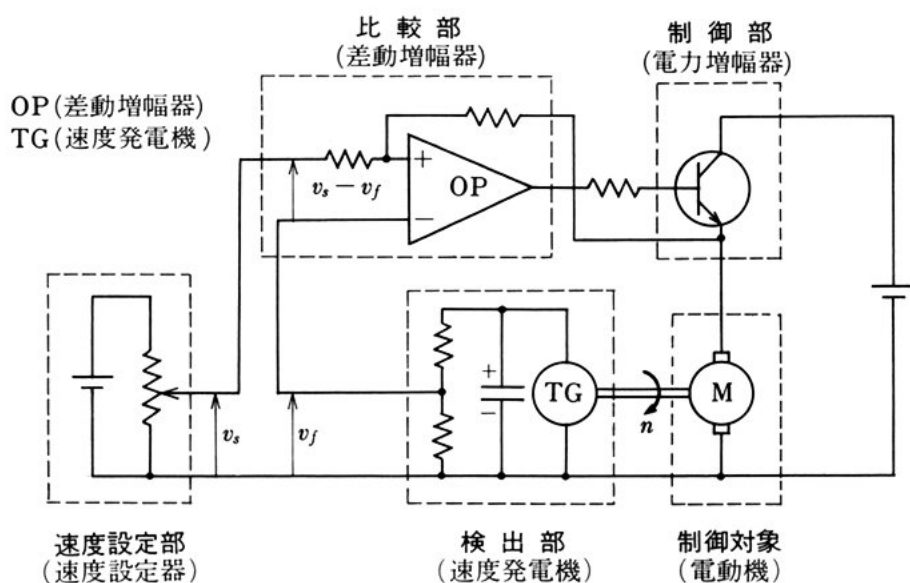
図 15　サーボ機構の例

(1)　サーボ機構

図15はサーボ機構の例であり，速度設定部(速度設定器)，比較部(差動増幅器)，制御部(電力増幅器)，制御対象(電動機)，検出部(速度発電機)からなる。

速度設定部で v_s [V] の値が設定されると，検出部の出力 v_f [V] との差の電圧が比較部に加えられ，制御部で増幅されて，$v_s - v_f = 0$ になるまで，電動機Mは動作する。

このように，物体の速度・位置・角度などを制御量として，目標値の任意の変化に追従するような自動制御系を**サーボ機構**という。図において，電動機Mのように，サーボ機構の制御対象となる電動機を**サーボモータ**という。ここで，Mは直流で動作する電動機であり，**直流サーボモータ**という。直流サーボモータには，永久磁石形直流電動機，ブラシレス直流電動機などが用いられる。

(2)　交流サーボモータ

サーボ機構の制御対象として交流電動機を用いることがあり，**交流サーボモータ**とよばれる。交流サーボモータには，二相サーボモータ，永久磁石形同期電動機，かご形誘導電動機が用いられる。

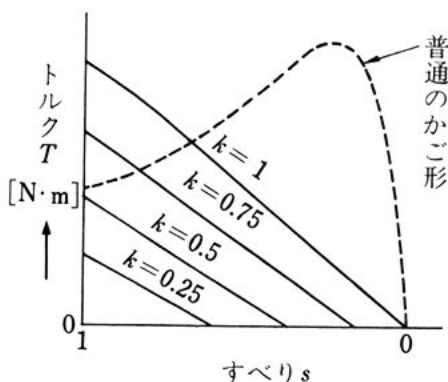



図 16　二相サーボモータのトルク－速度特性

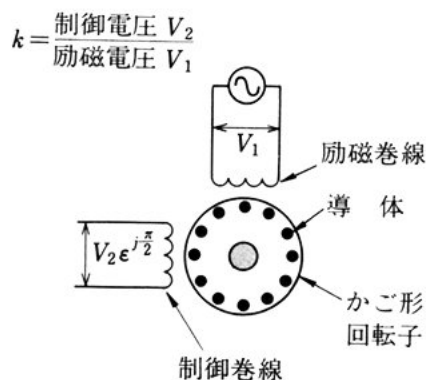



図 17　二相サーボモータの接続図

普通のかご形誘導電動機のトルク－速度特性は，図16の破線で示される。かご形導体の電気抵抗を大きくすると，実線で示すように，回転速度の上昇とともにトルクが低減する特性になる。このような特性をもつ電動機は，制御性に優れているので，交流サーボモータとして用いられる。

図17は，二相サーボモータの接続図で，励磁巻線と制御巻線は互いに直交するように配置され，それぞれの巻線は，互いに90°位相の異った電圧により励磁されている。ここで，励磁巻線には一定電圧を加え，制御巻線には制御信号に応じた電圧を加えて，回転子の速度制御を行う。

表3　主な制御用小形電動機の特徴・用途

<table>
<tr><th colspan="2">種　　類</th><th>特　　徴</th><th>主 な 用 途</th></tr>
<tr><td colspan="2">直流サーボモータ
(永久磁石形直流電動機)</td><td>・応答性が高い。
・小形軽量で大出力が得られる。
・整流子のまわりの保守が必要。</td><td>NC工作機機，産業用ロボット，コンピュータ周辺機器，事務機，音響・映像機器</td></tr>
<tr><td colspan="2">パルスモータ</td><td>・回転速度がパルス周波数に比例する。</td><td>コンピュータ周辺装置，事務機</td></tr>
<tr><td colspan="2">ブラシレス直流電動機</td><td>・整流子・ブラシがない速度制御用電動機。
・磁極位置の検出器が必要。</td><td>音響・映像機器，コンピュータ周辺機器</td></tr>
<tr><td rowspan="3">交流サーボモータ</td><td>永久磁石同期機方式
(永久磁石形同期電動機)</td><td>・整流子・ブラシがない位置制御用電動機
・磁極位置の検出器が必要。
・性能は直流サーボモータなみ。</td><td>NC工作機械(送り用)，産業用ロボット</td></tr>
<tr><td>二相サーボモータ</td><td>・堅牢である。
・取り扱いが簡便。</td><td>電気計測器</td></tr>
<tr><td>ベクトル制御誘導機方式
(かご形誘導電動機)</td><td>・一次電流を励磁電流成分とトルク電流成分に分けて制御する。
・性能は直流機なみ</td><td>NC工作機械(主軸駆動用)</td></tr>
</table>

すでに学んだ塊状鉄心誘導電動機，ドラグカップモータは，二相サーボモータとして用いられる。

（3）　制御用小形電動機の種類と用途

すでに学んだ制御用小形電動機について，その特徴および用途を表3に示す。

問　　題

1. 有溝鉄心形の永久磁石形直流電動機の電機子は，スロットが斜めになっているのはなぜか。図1を参照して考えよ。

2. 永久磁石形直流電動機（鉄心あり）に比べ，コアレス直流電動機にはどのような長所があるか。

3. ステップ角7.5°のパルスモータがある。パルス周波数1000［pps］を加えると，電動機の回転速度はいくらになるか。

4. パルスモータに加わるパルス周波数が，2000［pps］のとき，回転速度が300［rpm］であった。この電動機のステップ角を求めよ。

5. 図5において，p形ホール素子をn形ホール素子に置き換えた。端子c，d間のホール電圧の向きはどうなるか。

6. 図6(a)に示す電動機の死点はどこか。回転子の磁極の位置で示せ。

7. ブラシレス直流電動機は，永久磁石形直流電動機に比べて出力効率が低い。なぜか。

8. サーボモータには，どんな特性が必要か。

9. 二相サーボモータに用いられる電動機には，どんな種類があるか。

第7章

半導体電力変換装置

交流電力を直流電力に変換する整流装置，直流電力を交流電力に変換するインバータ装置，交流電力を周波数の異なる交流電力に変換する周波数変換装置などは，一般に電力変換装置とよばれる。

電力変換装置には，電動機の制御などに用いられる低電力で簡易なものから，電気鉄道，電気化学工業あるいは送配電設備などに用いられる大規模なものまである。

ここでは，広く利用されているシリコン整流素子やシリコン制御整流素子を用いた半導体電力変換装置の原理や用途などについて調べる。

半導体電力変換装置

1.　シリコン整流素子と整流回路

シリコン整流素子は，シリコン整流器あるいは**シリコンダイオード**ともよばれる。とくに大きな電力の回路に用いられるものは**電力用ダイオード**とよばれる。

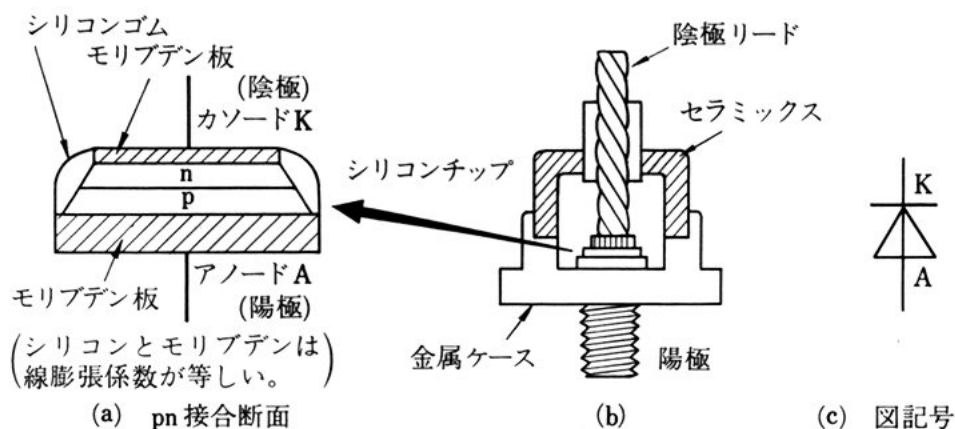
(1)　シリコンダイオード

シリコンダイオードは，シリコン単結晶に不純物を加えて，図1(a)に示すようにpn接合をつくり，電極としてアノード(陽極)，カソード(陰極)を設けてある。これを密封して，図(b)の例のように作られている。図(c)はその図記号である。

ダイオードは，アノードAからカソードKへの順方向には，導体に近い低い抵抗値を示し，KからAへの逆方向には絶縁体に近い高い抵抗値を示す。一般に，順方向に加える電圧を**順電圧**，流れる電流を**順電流**といい，逆方向に加える電圧を**逆電圧**，流れる電流を**逆電流**という。

ダイオードに逆電圧を加え，その電圧を高くしていくと，急激に大きな電流が流れる。そのときの電圧を**ブレークオーバ電圧**という。

図1　シリコンダイオード

(a)　pn接合断面　　(b)　　(c)　図記号

したがって，逆電圧は，ブレークオーバ電圧を超えないように，ある値（定格逆耐電圧）以下にする。

また，過大の順電流を流すとダイオードの特性が劣化し，焼損する。したがって，平均順電流は，ある値（定格平均順電流）以下になるようにする。

電力用ダイオードでは，逆耐電圧 6000［V］，平均順電流 4000［A］程度のものもある。

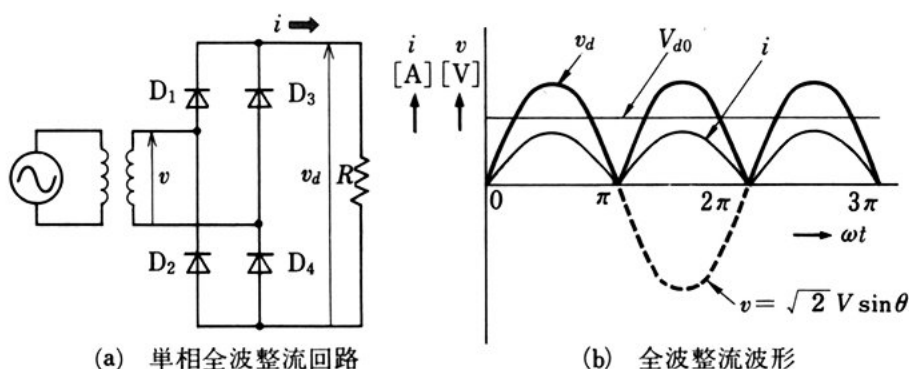
問 1. ダイオードの抵抗は，流れる電流の大きさによって変わる。順電圧 1.2［V］のとき，順電流は 500［A］であるという。このときの抵抗を求めよ。また，逆電圧 1200［V］のとき，逆電流は 50［mA］であるという。このときの抵抗を求めよ。

（2） 整流回路の例

図 2(a)に示すように，ダイオードを 4 個使用すると，単相全波整流回路を構成することができる。図(b)は，電源電圧 v［V］，抵抗 R［Ω］の両端の電圧 v_d［V］，v_d の平均電圧 V_{d0}［V］，抵抗 R［Ω］に流れる電流 i［A］の波形を示す。

図において，電源電圧 v［V］の位相が 0〜π［rad］の正の半サイクルにおいては，ダイオード D_1，D_4 が導通し，抵抗 R［Ω］には i

図 2　ダイオードを用いた整流回路と波形

(a)　単相全波整流回路　　(b)　全波整流波形

[A] の電流が流れる。導通時におけるダイオードの電圧降下はきわめて小さいので，抵抗の両端の電圧 v_d [V] は，v [V] とほとんど等しい。なおこの場合，D_2，D_3 は導通していない。

次に，電源電圧 v [V] の位相が π～2π [rad] の負の半サイクルになると，ダイオード D_2，D_3 が導通し，抵抗 R [Ω] に流れる電流 i [A] および v_d [V] の大きさと方向は，正の半サイクルの場合と同じになる。

なお，電源電圧 v の実効値を V [V] とすれば，整流電圧 v_d の平均値，すなわち**直流平均電圧** V_{d0} [V] は，次の式で表される*。

$$V_{d0}=0.9V \quad (1)$$

問 2. 図2において，V_{d0} の値を 600 [V] にするためには，電源電圧 v の実効値を何Vにすればよいか。

問 3. 変圧器，ダイオード1個，抵抗 R [Ω] を用いた単相半波整流回路をかいてみよ。また，この場合の電源電圧の実効値 V [V] と整流電圧 v_d の直流平均電圧 V_{d0} [V] との関係を式で示せ。

2. シリコン制御整流素子と整流回路

シリコン制御整流素子はサイリスタともよばれ，整流作用のほかに制御機能をもっている。

(1) サイリスタ

サイリスタは，図3(a)に示すように，シリコン半導体の pnpn の4層構造になっている。その一端のp形半導体にアノード電極Aを，他端のn形半導体にカソード電極Kを，その中間のp形半導体

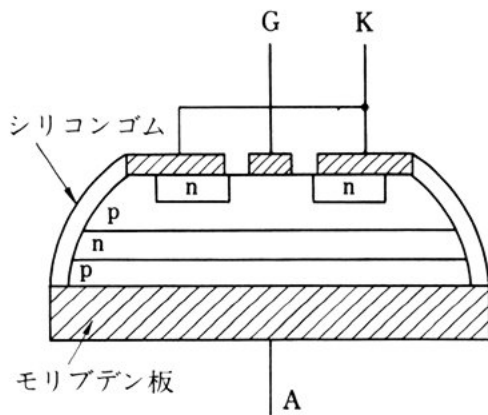
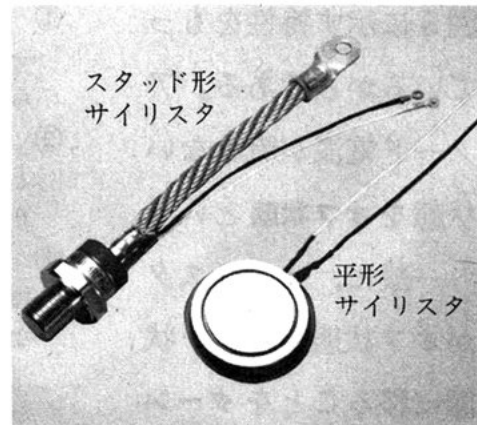
* $V_{d0}=\dfrac{1}{\pi}\displaystyle\int_0^{\pi}\sqrt{2}\,V\sin\theta\,d\theta=\dfrac{2\sqrt{2}}{\pi}V=0.900\,V$

(a)　pn接合断面　　(b)

図3　サイリスタ

にゲート電極Gを設けてある。

サイリスタには，外部端子が2〜4個のものがあるが，3端子のものが多く用いられている。図(b)はサイリスタの例である。

大容量の平形サイリスタには，逆耐電圧8000［V］，平均順電流4000［A］程度のものがある。

（2）　サイリスタの性質

図4に示すように，サイリスタThのアノードA，カソードK，ゲートGを接続し，スイッチS_1，S_2を開いておく。

この回路で，S_1を閉じても，抵抗Rを通るアノード電流はほとんど流れない。このとき，S_2を閉じて，Gに正の電圧を加えると，アノード電流が流れる。この状態を**オン状態**という。

図4　サイリスタの回路

ひとたびアノード電流が流れると，S_2を開いてもアノード電流は流れ続ける。アノード電流を阻止するためには，S_1を開かなければならない。サイリスタにこのような性質があるのは，サイリスタが

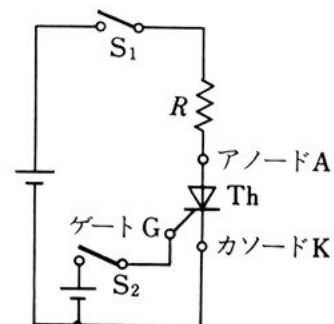



図5に示す特性をもっているからである。アノード電流が流れない状態を**オフ状態**という。

一般に，サイリスタがオフ状態からオン状態に移ることを**ターンオン**，オン状態からオフ状態に移ることを**ターンオフ**という。

なお，このような性質のサイリスタは，逆阻止3端子サイリスタとよばれる。図4のThは，この図記号でかかれている。

① サイリスタをオンにするためには，図のブレークオーバ電圧より高い電圧を加えなくてはならない。

② ゲートに正の電圧を与え，ゲート電流を流すと，ブレークオーバ電圧が低下するので，サイリスタをオンにすることができる。

③ いちどターンオンすると，アノード電流を保持電流以下にしないと，アノード電流はオフにならない。

図5　サイリスタの電圧－電流特性

（3）　サイリスタを用いる位相制御

図6に示す回路は，サイリスタによる位相制御を行うことによって，出力電圧を制御できる二相半波整流回路（単相全波整流回路）である。

この回路では，交流がある位相のとき，ゲートGに電流(パルス)を流すことによってアノード電流を制御し，直流電力を制御することができる。

この回路にはTh_1，Th_2の二つのサイリスタが用いられており，交流電圧が加えられて，次のことが行われる。

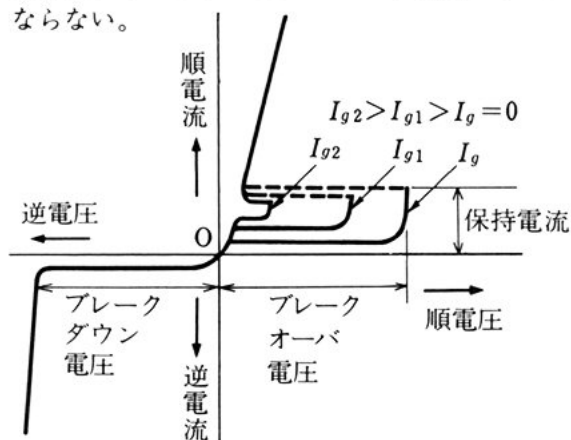
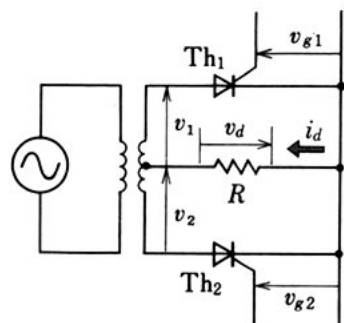



図6　サイリスタを用いる位相制御

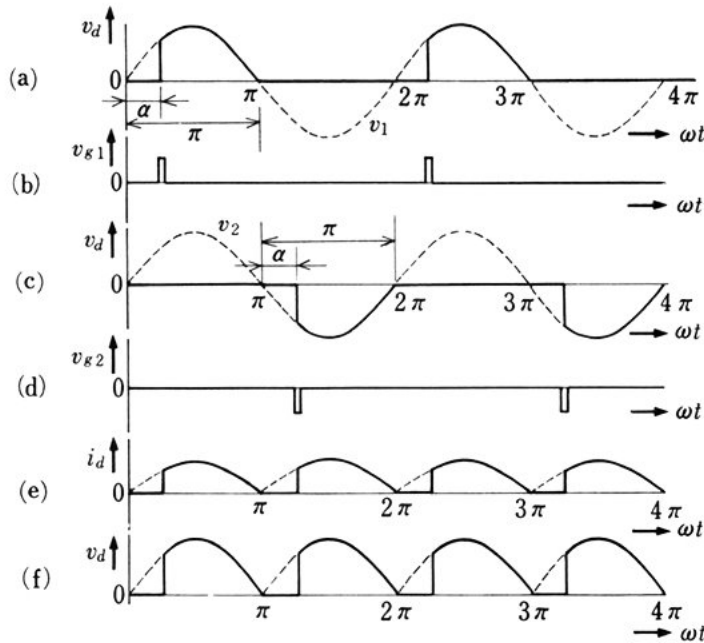



図 7　位相制御における波形

1)　交流電圧 v [V] が 0〜π [rad] の間は，サイリスタ Th_1 には順電圧，サイリスタ Th_2 には逆電圧が加えられている。

2)　Th_1 には順電圧が加えられているので，図 7 (a), (b) に示すように，Th_1 にゲート電圧 v_{g1} [V] が与えられると，Th_1 は位相角 α でターンオンする。この位相角を**点弧角**または**制御角**という。

3)　したがって，抵抗 R [Ω] には図 (e) に示す i_d [A] が流れ，その両端には図 (f) に示す v_d [V] が生じる。

4)　交流電圧 v_1 [V] が π [rad] に近づくと，Th_1 は順電流が保持電流以下となり，ターンオフする。

5)　交流電圧 v_2 [V] が π [rad] を超えると，図 (c) に示すように，Th_2 に順電圧が加わり，$(\pi+\alpha)$ [rad] になると，図 (d) に示すパルス v_{g2} [V] が Th_2 のゲートに加わり，Th_2 がターンオンする。

6)　このようにして，図(e)，(f)に示すように i_d [A] が流れ，R [Ω] には v_d [V] が生じ，全波整流波形が得られる。

単相全波整流回路では，電源電圧の実効値を V [V]，位相角 α [rad] のときの直流平均電圧を $V_{d\alpha}$ [V] とすれば，次の式がなりたつ*。

$$V_{d\alpha}=0.9V\frac{1+\cos\alpha}{2} \qquad (2)$$

問 4. 図6，図7において，位相角 α が30°，45°，60°の各場合の直流平均電圧 V_{d30} [V]，V_{d45} [V]，V_{d60} [V] を求めよ。ただし，電源電圧の実効値 V は 200 [V] とする。

（4）三相整流回路

三相半波整流回路は，図8に示すように，3個のサイリスタを用いて構成される。電源には，二次側をY結線にした三相の変圧器が用いられる。図9は三相半波整流回路の波形で，図(a)は位相角 α が 0 [rad] の場合，図(b)は 0 [rad] でない場合を示す。

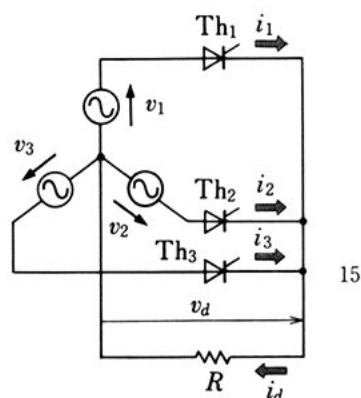
図 8　三相半波整流回路

図(b)の $0\leqq\alpha\leqq\frac{\pi}{6}$ の範囲では，直流平均電圧 $V_{d\alpha}$ [V] は次の式で表される**。

$$V_{d\alpha}=1.17V\cos\alpha \qquad (3)$$

問 5. 図8，図9において，電源電圧 V が 200 [V]，位相角 α が30°であれば，直流平均電圧 $V_{d\alpha}$ [V] はいくらか。

図10は，三相全波整流回路の例である。図11はその整流波形の

---

*　$V_{d\alpha}=\frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi}\sqrt{2}\,V\sin\theta\,d\theta=\frac{2\sqrt{2}}{\pi}V\frac{1+\cos\alpha}{2}=0.9V\frac{1+\cos\alpha}{2}$

**　$V_{d\alpha}=\frac{3}{2\pi}\int_{-\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{\pi}{3}+\alpha}\sqrt{2}\,V\cos\theta\,d\theta=\frac{3\sqrt{6}}{2\pi}V\cos\alpha=1.17V\cos\alpha$

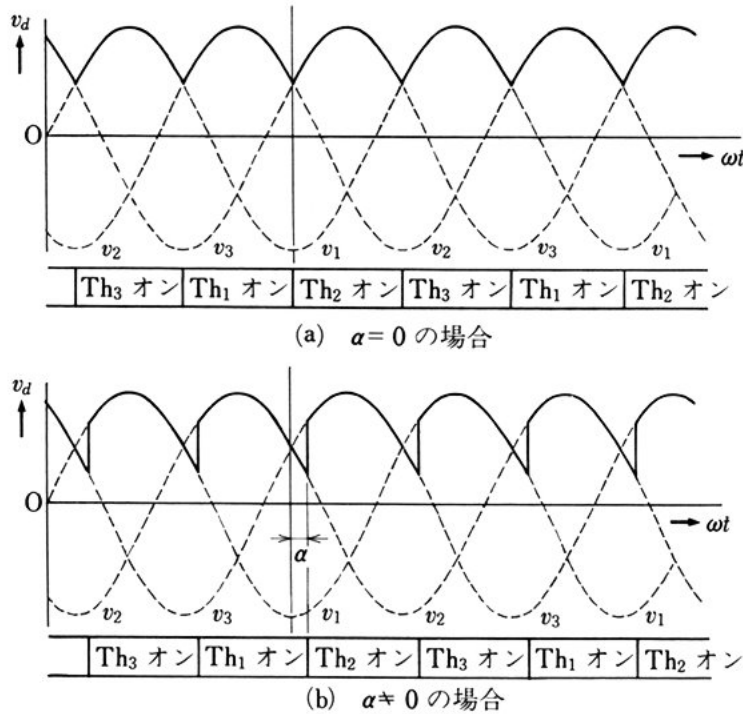
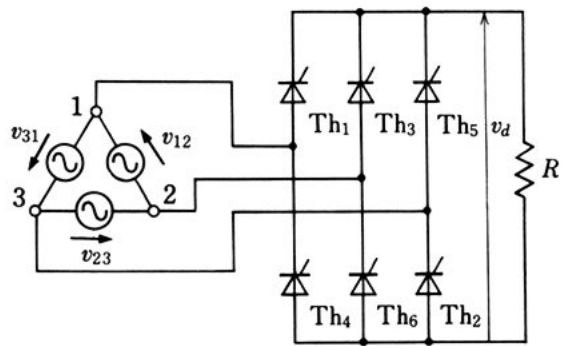



図 9　三相半波整流波形

例で，図(a)は位相角 α が 0 [rad] の場合，図(b)は 0 [rad] でない場合を示す。

この回路で，$0 \leqq \alpha \leqq \frac{\pi}{3}$ では直流平均電圧 $V_{d\alpha}$ [V] は次の式で表される*。

図 10　三相全波整流回路

$$V_{d\alpha}=1.35\,V\cos\alpha \qquad (4)$$

問 6. 図10において，線間電圧 V が 200 [V]，位相角 α が 30° のときの直流平均電圧 $V_{d\alpha}$ [V] を求めよ。

---

* $V_{d\alpha}=\frac{3}{\pi}\int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2}{3}\pi+\alpha}\sqrt{2}\,V\sin\theta\,d\theta=\frac{3\sqrt{2}}{\pi}V\cos\alpha=1.35\,V\cos\alpha$

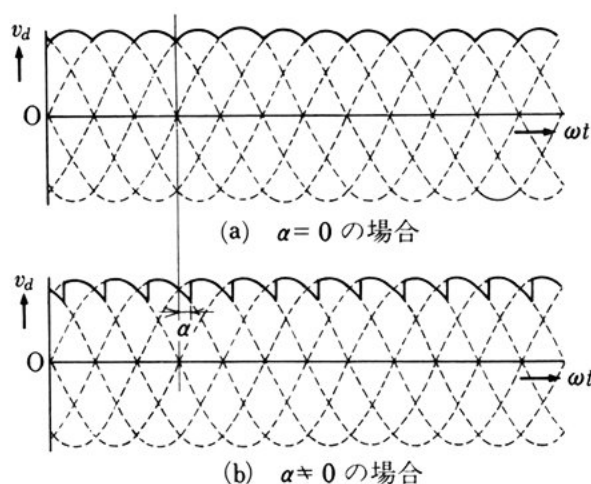



図 11　三相全波整流波形

（5）　還流ダイオード

図 12 (a) に示すように，整流回路の負荷にインダクタンスがある場合，負荷電流 i_d [A] の変化によって，インダクタンス L [H] に誘導起電力 v_L [V] が発生する。このインダクタンス L [H] に蓄えられるエネルギーは，電流として放出され，図 (b) のように電源電圧が負の半サイクルになってもなおしばらく流れ続ける。この状態では，負荷電流が 0 [A] になるまでは，負荷に負の電圧（逆向きの電圧）が加わることになり，直流電圧 v_d [V] の平均値が下がってしまう。

そこで，図 13 (a) のように，ダイオード D を負荷に並列に挿入する。電源電圧 v [V] がインダクタンス L [H] の誘導起電力 v_L [V]

図 12　誘導性負荷の整流波形

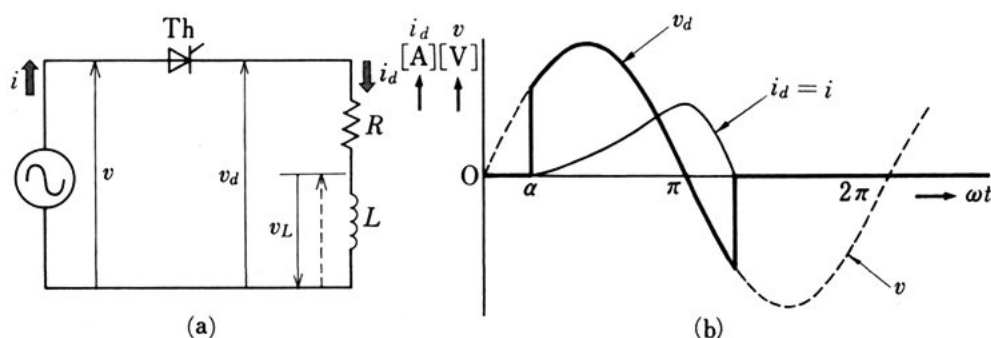
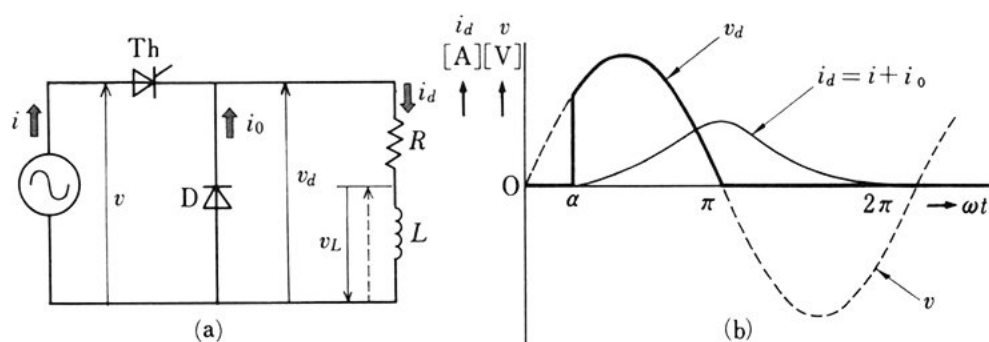



図 13　還流ダイオード付きの整流波形

より低くなると，負荷を流れる電流は，ダイオードDの回路を通り，負荷に還流する。このため，電源電圧 v [V] が負の半サイクルでは，直流電圧 v_d [V] は，図(b)のように負の電圧が加わることがなく，整流特性もよくなる。このように用いられるダイオードは**還流ダイオード**とよばれる。

問 7.　図12(a)の回路において，電源電圧 v [V] が負であっても，負荷電流 i_d [A] が流れる。なぜか。

3.　電圧安定化回路

整流回路は，整流用変圧器の巻線抵抗や整流素子の抵抗などの電圧降下のため，負荷電流によって出力電圧が変動する。電圧が一定な直流電源を必要とする測定器や電子計算機などでは，負荷が変わってもつねに一定な電圧が得られるような工夫がなされている。

負荷の端子電圧を一定に保つには，図14(a)に示すように，整流回路と負荷 R [Ω] との間に抵抗 R' [Ω] を接続し，この値を調整すればよい。

また，図(b)に示すように，抵抗 R' [Ω] の代わりにトランジスタ Tr_1 を接続し，そのベース電流を調整してもよい。

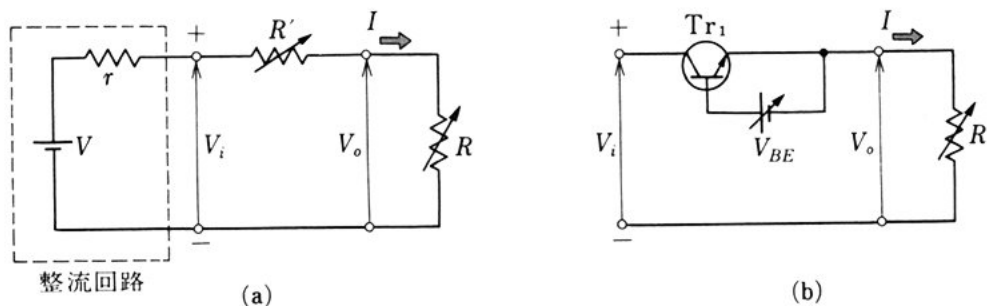



図 14　電圧安定化の原理（直列制御）

図15の電圧安定化回路では，出力電圧 V_o [V] は，基準電圧 V_s [V]（定電圧ダイオード D_z によって得られる）と，抵抗分圧比 $n\left(=\dfrac{R_2}{R_1+R_2}\right)$ とによって定まる電圧 $\dfrac{V_s}{n}$ [V] に保たれる。

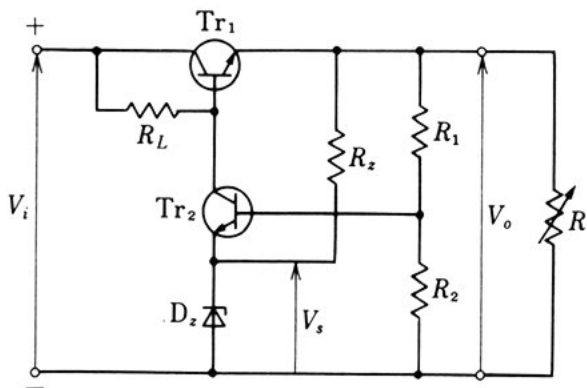



図 15　電圧安定化回路

この回路は，次に示す動作を行う。

1)　V_o [V] が増すと誤差増幅用トランジスタ Tr_2 のベース・エミッタ間の電圧が増し，Tr_2 のベース電流が増す。

2)　Tr_2 のベース電流が増すと，コレクタ電流が増し，Tr_2 の負荷抵抗 R_L [Ω] の電圧降下が増す。

3)　R_L [Ω] の電圧降下が増すと，Tr_2 のコレクタ電位が下がり，制御用トランジスタ Tr_1 のベース電位が下がる。

4)　Tr_1 のベース電位が下がると，Tr_1 のベース電流が減り，コレクタ電流すなわち負荷電流が減る。

5)　Tr_1 のコレクタ電流が減るから，出力電圧が下がる。

なお，出力電圧は，抵抗分圧比 n を変えることによって，任意に設定することができる。

問 8． 図15で，出力電圧が減少したときの電圧安定化回路の働きを調べよ。

5 **問 9．** 図15で，定電圧ダイオード D_z の負荷抵抗 R_z の働きを調べよ。

問 10． 図16の回路において，定電圧ダイオード D_z によって得られる基準電圧（ツェナー電圧）は6［V］，電源電圧 V は12［V］である。抵抗 R［Ω］の両端の電圧，および端子Aの
10 電位はいくらか。

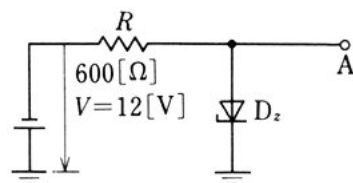



図 16

4．インバータとその応用

これまでに学んだ整流装置のように，交流電力を直流電力に変換することを**順変換**といい，直流電力を交流電力に変換することを**逆**
15 **変換**という。逆変換を行う装置を**逆変換装置**または**インバータ**という。

（1） インバータの基本回路

図17はインバータの基本回路を説明するための図である。

最初，S_4 は閉じており，そこで S_1 を閉じると，負荷に電源電圧 V
20 ［V］が加わる。次に，S_4 を開き S_3 を閉じると負荷は短絡され，負荷に加わる電圧は0［V］になり，正の半サイクルが終わる。

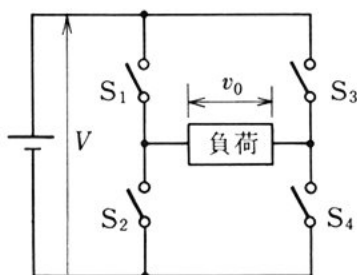
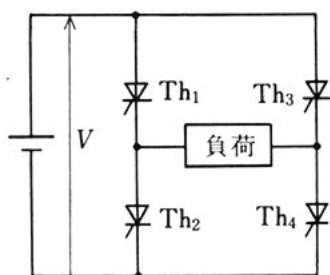
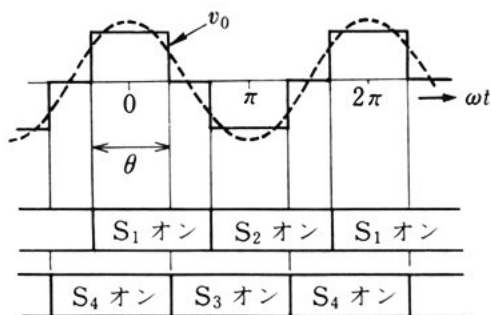
続いて，S_1 を開き S_2 を閉じると，負荷には前と逆向きの電圧が加わる。次に S_3 が開き S_4 を閉じると負荷は短絡され，負の半サイクルが終わる。このように，スイッチを順序よく開閉することによって，

(a)　回路の原理図　　(b)　インバータの基本回路

(c)　出力波形

図 17　インバータの基本回路と出力波形

負荷には図(c)に示す方形波の交流電圧 v_0 が発生する。実際のインバータは，図(b)に示すように，四つのスイッチの代わりにサイリスタがよく用いられる。このほかトランジスタなどの素子も使われる。なお，図(c)の方形波の交流電圧は，フィルタを通して滑らかな正弦波交流電圧の波形になっている。

問 11．図 17(a)の回路において，50 [Hz] の交流を発生させるためには，S_1 は 1 秒間に何回オン・オフを繰り返さなければならないか。また，S_1 がオンになっている時間は，1 回について何秒か。

(2)　フィルタ

方形波には多くの高調波成分が含まれている。そこでフィルタを通して高調波を除去し，ひずみのない正弦波を得る。

図 18 に示すインダクタンス L [H] とコンデンサ C [F] からなる回路は，低周波ここでは基本波を通過させ，高調波を除去する LC

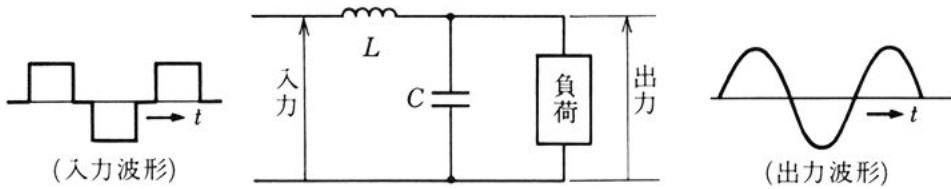



図 18　*LC* 形フィルタの働き

形フィルタである。インダクタンス L [Hz] は，高調波に対して大きなリアクタンスとして働き，コンデンサ C [F] は，高調波に対して小さなリアクタンスとして働き，高調波が負荷に流れるのを防ぐ。

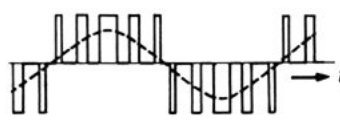
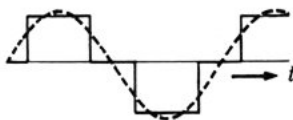
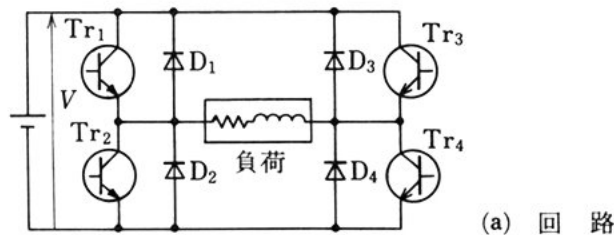
問 12．図 18 において，インダクタンス L [H] とコンデンサ C [F] を入れ換えると，どんな性質のフィルタになるか。

（3）トランジスタインバータ

トランジスタインバータの基本回路を図 19 (a) に示す。トランジスタ Tr_1～Tr_4 は，図 17 (a) のスイッチ S_1～S_4 の役目を果たす。トランジスタ Tr_1～Tr_4 に並列に入っているダイオード D_1～D_4 は還流ダイオードとよばれる。

図 19 において，インバータの出力は，スイッチングのパルス幅に

図 19　トランジスタインバータ

(a)　回　路

(b)　単一 PWM インバータ波形　(c)　高周波 PWM インバータ波形

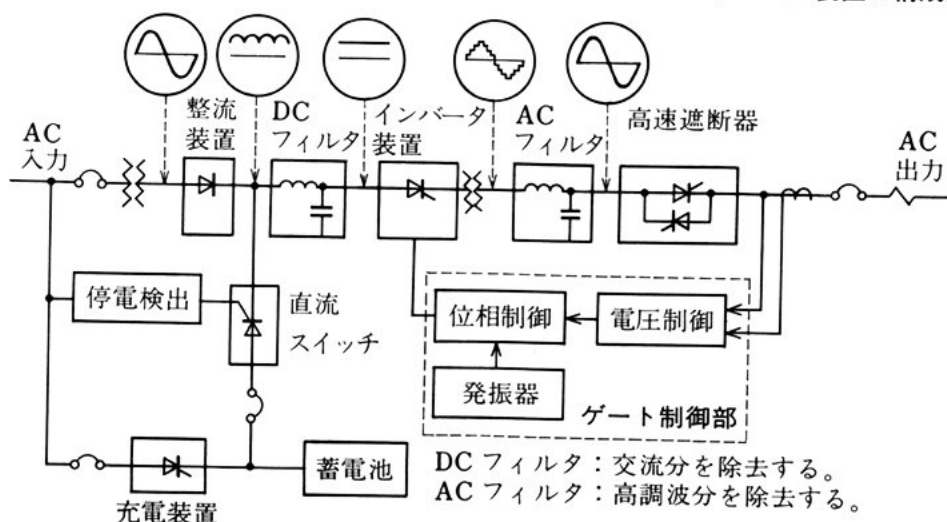
よって制御される。この制御方式を**パルス幅変調**（pulse width modulation : **PWM**）**方式**という。PWM 方式には，図(b)に示す単一パルス幅変調方式，図(c)に示す高周波パルス幅変調方式などがある。高周波 PWM 方式は，スイッチング周波数を高くしたパルス幅変調方式のことである。これは高調波成分を除くフィルタを小さくでき，インバータ装置も小形にできる。

問 13.　高周波 PWM 方式では，LC 形フィルタのインダクタンス L [H] やコンデンサ C [F] の値を小さくできるのはなぜか。

（4）　インバータの応用

誘導電動機の可変速運転には，可変電圧可変周波数（variable voltage variable frequency : VVVF）電源装置が使われることがある。また，電気通信設備や電子計算機のための電源には，定電圧定周波数（constant voltage constant frequency : CVCF）電源装置や無停電（uninterruptable power supply : UPS）電源装置が用いられる。これらの多くは，インバータを利用している。

図 20 は，サイリスタを利用した CVCF 電源装置の構成図である。

図 20　サイリスタ式 CVCF 装置の構成図

図において，次のことがなされる。

1)　交流入力電源が正常なときには，整流装置とDCフィルタにより平滑な直流電圧を得る。

2)　これをインバータ装置により交流電圧に変換する。

3)　蓄電池は，充電装置によって充電状態に保たれる。

4)　高速遮断器は，1台運転の場合には必ずしも必要ではない。

5)　交流電源の停電の場合，停電を検出して直流スイッチを導通させ，整流器に代わって蓄電池から直流電力を送る。

6)　ゲート制御部は，破線内に示すように，発振器，電圧制御回路，位相制御回路からなる。

一定周波数の交流電源から，異なった周波数の交流電源を得るときに**周波数変換**が行われる。

一般に，交流入力をいったん整流してから，入力の周波数とは異なる周波数の交流を作り出す方式を **インバータ式周波数変換** または **交流間接変換** という。これに対して交流入力を直接周波数変換するものがある。これを**サイクロコンバータ**という。

問 14.　誘導電動機の速度制御に，VVVF電源を利用すると，どんな点で都合がよいか。

問 15.　電気通信設備や電子計算機の電源としては，電源の瞬断は許されない。なぜか。

5. 直　流　変　換

交流電力を送る場合，電圧は変圧器によって容易に昇圧や降圧ができる。しかし，直流の昇圧や降圧は容易でない。

直流の昇圧や降圧は，**直流変換**（DC → DC 変換）とよばれる。直流

変換を損失が少ない状態で行うための回路に**DCチョッパ**がある。

DCチョッパは，直流電力を半導体素子でオン・オフさせ，その通電時間（パルス幅）を制御することによって直流電圧を得る。チョッパは，素子の種類によってトランジスタチョッパ，サイリスタチョッパ，GTOチョッパなどがある。また，チョッパには，出力電圧が0［V］から電源電圧まで変えられる**降圧チョッパ**と，電源電圧以上に変換できる**昇圧チョッパ**とがある。

GTOは，**ゲートターンオフサイリスタ**（gate turn-off thyristor）の略称で，サイリスタと同じpnpn構造の半導体素子である。

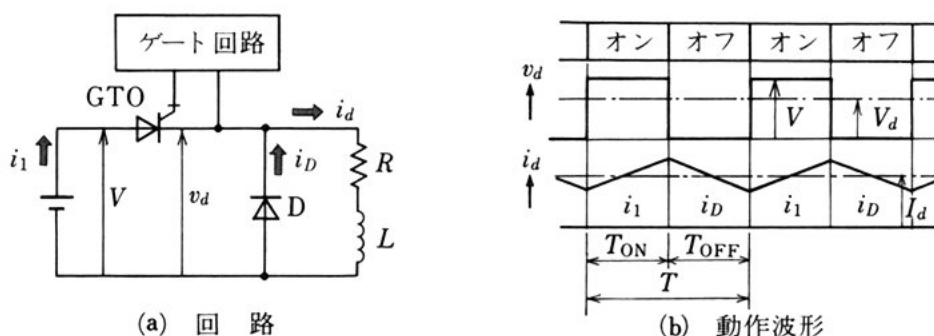
GTOをターンオンさせるには，サイリスタと同じように，ゲートに正のパルスを加える。ターンオフは，ゲートに負のパルスを加えることによって容易に行える。

GTOは，サイリスタに比べて，ゲート回路が簡単になる。また，逆耐電圧4000［V］，平均順電流3000［A］程度の大容量のものも開発され，GTOの利用はますます盛んになっている。

図21は，GTOによる降圧チョッパ回路である。負荷にインダクタンスがあるので，還流ダイオードDが負荷に並列に接続されている。GTOがオンのとき，負荷に電流i_d［A］が流れる。GTOがオフになると，インダクタンスに蓄えられたエネルギーが，ダイオード

図21　GTOチョッパ（降圧形）

(a)　回　路

(b)　動作波形

を通って負荷に還流する。このため，負荷電流 i_d [A] は，図(b)に示すように連続した脈動電流になる。図(b)の周期 T でオン・オフを繰り返すとき，出力電圧 v_d の平均値 V_d [V] は，次の式で表される。

5

$$V_d = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} V \tag{5}$$

チョッパの出力は，オン・オフの通電時間 T_{ON} [s]，T_{OFF} [s] を制御することで必要な電圧を得ることができる。

問16． 図21において，電源電圧 V が200 [V]，T_{ON} が70 [ms]，T_{OFF} が30 [ms] であるときの v_d の出力電圧の平均値 V_d [V] はいくらか。

10

問　　題

1． 図2において，電源電圧 v の実効値が200 [V] である。v_d の直流平均電圧 V_{d0} [V] はいくらか。

2． 図6の電源電圧 v の実効値が100 [V] である。制御角 α が0°の場合，抵抗 R [Ω] の直流平均電圧 V_{d0} [V] はいくらか。また，Th_1，Th_2 の逆電圧 V_r [V] はいくらか。また，制御角 α が60°の場合，抵抗 R [Ω] の直流平均電圧 $V_{d\alpha}$ [V] はいくらか。

15

3． 図8の相電圧の実効値が200 [V] で，制御角 α が30°である。出力の直流平均電圧 $V_{d\alpha}$ [V] はいくらか。

20

4． サイリスタとGTOとの違いを述べよ。

5． 電力用トランジスタとGTOの違いを述べよ。

6． DCチョッパの電源電圧が24 [V]，繰り返し周波数が500 [Hz] である。通電時間 T_{ON} を1 [ms] とすると，出力電圧の平均値 V_d [V] はいくらか。

問 題 解 答

第1章 直　流　機

1 節　**問 1.** 2.4 [V]　**問 2.** 206 [V]　**問 3.** 10 [Ω], 4 [kW]　**問 5.** 103 [V], 5.15 [kW]

問題 4. 0.05 [Wb]　**5.** 167 [V], 83.3 [A]

2 節　**問 1.** 0.16 [N・m]　**問 2.** 31.8 [N・m], 5 [kW]　**問 3.** 63.7 [N・m]　**問 4.** 0.3 [Ω]　**問 5.** 1630 [rpm]　**問 7.** 35.4 [A], 1410 [rpm]　**問 9.** 2.46 [Ω]　**問 11.** 1130 [rpm]

問題 1. (1) 193 [V]　(2) 9.25 [kW]　(3) 3.3 [Ω]　**3.** 39.5 [N・m]　**4.** 109 [V]　**5.** 86.6 [A], 1150 [rpm]

3 節　**問 1.** 37 [%]　**問 2.** 7.5 [%]　**問 3.** 13.3 [%]　**問 4.** 6.02 [kW], 59.2 [A]

問題 1. 5 [%]　**2.** 3.45 [%]　**3.** 5.43 [%]　**4.** 87 [%]

第3章 変　圧　器

1 節　**問 4.** 210 [V], 42 [A], 1.4 [A]　**問 5.** 1.13×10^{-2} [Wb], 16.7 [%]　**問 8.** 20, $0.2+j2$ [Ω], $0.0005+j0.005$ [Ω]　**問 9.** 200 [V], 2.5 [A], 80 [Ω]　**問 11.** 0.0005 [Ω], 0.005 [Ω], 0.005 [Ω], 0.0005 [Ω], 0.072 [S], 0.364 [S]　**問 12.** 10^3 [A]　**問 13.** 10 [kΩ]

問題 1. 2.30×10^{-6} [S], 30.2×10^{-6} [S], 30.3×10^{-6} [S]　**2.** (1) 242 [A], 8.07 [A]　(2) 250 [A], 8.33 [A]　**3.** 0.725 [A]

2 節　**問 1.** 10 [%]　**問 2.** 221 [V]　**問 3.** 1.64 [%], 4.08 [%]　**問 5.** 1 [%], 2 [%], 2.24 [%]　**問 6.** 9.32 [%], 6.04 [%]　**問 7.** 189 [A]　**問 9.** 64 [%], 64 [%]　**問 10.** 0.004 [S], 0.0145 [S], 0.267　**問 11.** 99.0 [%], 98.3 [%]　**問 12.** 99.2 [%]　**問 13.** 98.2 [%]　**問 15.** 70.1 [°C]

問題 2. 6460 [V]　**4.** 170 [A]　**5.** 0.856 [kW]

3 節　**問 5.** 8 [kVA]　**問 8.** 30°　**問 10.** 34.6 [kVA]

問題 1. (1) ①→u　(2) ②→U　(3) 溶断したとき　③→v, ④→u, 溶断しないとき　③→u, ④→v　**2.** (1) △-Y 結線　(2) V [V], V [V], $\sqrt{3}\ V$ [V]　**3.** (1) 30 [kVA]　(2) 17.3 [kVA]　(3) 5.77 [A], 86.6 [A], 3.33 [A], 50 [A]　**4.** 2080 [kVA], 180 [A], 601 [A]　**5.** 11.1 [A], 167 [A], 5200 [V]　**6.** 86.6 [kVA] 以下

4 節　**問 6.** 10000 [kW]

問題 2. 111 [A], 100 [A], 11 [A], 900 [V]

第4章　誘　導　機

1 節　**問 1.** 50回転 **問 2.** 1500 [rpm] **問 3.** 900 [rpm] **問 8.** 3.33 [Hz] **問 10.** $I_2=\frac{E_2}{\sqrt{r_2{}^2+x_2{}^2}}$ **問 12.** 31.3 [A] **問 13.** 1140 [rpm], 15200 [W], 3 [Hz] **問 14.** (1) 1500 [rpm] (2) 4 [%] (3) 0.96 (4) 460 [W] **問 15.** $\frac{1}{4}$倍 **問 16.** 127 [N·m], 15.2 [kW] **問 17.** 30 [%] **問 18.** 66.7 [A] **問 19.** $\frac{2}{3}$倍, $\frac{4}{9}$倍 **問 21.** 13.2 [A], 3.53 [kW], 86.4 [%], 89.4 [%], 3.95 [%], 19.5 [N·m]

問題 1. ①—Ⓒ, ②—Ⓑ, ③—Ⓐ, ④—Ⓕ, ⑤—Ⓔ, ⑥—Ⓓ **3.** 0.04, 2 [Hz] **4.** (1) 0.04 (2) 22.9 [kW] (3) 0.96 (4) 22.9 [kW] **7.** 17.4 [kW], 2.4 [kW], 11.9 [kVA] **8.** (1) 960 [rpm], 1150 [rpm] (2) 458 [W] (3) Y-△始動法

2 節　**問 6.** 300 [V], 287 [V], 250 [V], 200 [V], 150 [V], 113 [V], 100 [V]

第5章　同　期　機

1 節　**問 1.** 250 [rpm] **問 9.** 1.2, 83.3 [%], 10.6 [Ω]
問 11. $\sqrt{3}\ V_nI_n$ [VA]

問題 1. (a)同期リアクタンス (b)電機子抵抗 (c)同期インピーダンス
2. 2.54 [Ω], 0.95, 105 [%] **4.** 力率 64 [%], 80 [%], 71.5 [%], 有効分電流 640 [A], 640 [A], 1280 [A], 無効分電流 768 [A], 480 [A], 1250 [A], 負荷の電流 1790 [A], 負荷の電力 4860 [kW] **5.** A 3800 [kW], B 1060 [kW]

2 節　**問題 1.** 3000 [rpm], 1200 [rpm] **4.** $212\varepsilon^{-j0.337}$ [V], 0.337 [rad]=19.3°

3 節　**問 2.** 不安定 **問 3.** 18.7 [kW] **問 4.** 9.6 [kW]

第6章　小 形 電 動 機

問題 3. 1250 [rpm] **4.** 0.9°

第7章　半導体電力変換装置

問 1. 2.4 [mΩ], 24 [kΩ] **問 2.** 667 [V] **問 3.** $V_{d0}=0.45\,V$ **問 4.** 168 [V], 154 [V], 135 [V] **問 5.** 203 [V] **問 6.** 234 [V] **問 10.** 6 [V], −6 [V] **問 11.** 50回, 10 [ms] **問 16.** 140 [V]

問題 1. 180 [V] **2.** 90 [V], 283 [V], 67.5 [V] **3.** 203 [V] **6.** 12 [V]

索　　引

■別記著作者

林　　泉	高野雄三郎
緒方　興助	高橋　日吉
新井　芳明	高橋　亮一
海老塚佳衛	柄本　治利
鬼塚　新一	馬場秀三郎
熊谷　文宏	平井　喜之
久米　健一	藤縄　英作
菅谷　光雄	

●表紙デザイン
杉山久仁彦

平成元年3月31日　文部省検定済

電気技術ⅠA 改訂版

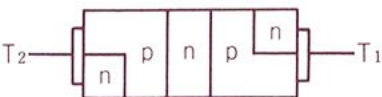
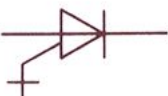
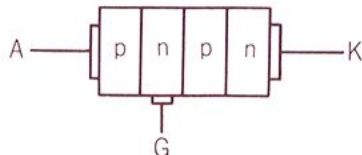
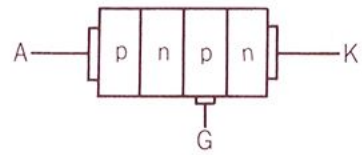
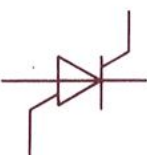
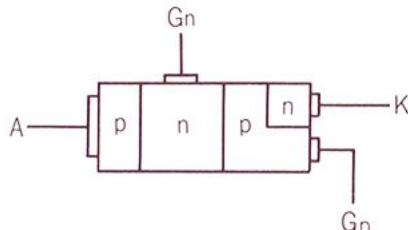
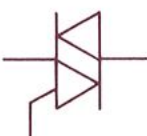
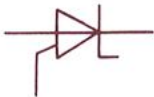
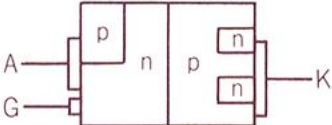
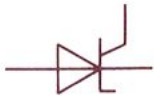
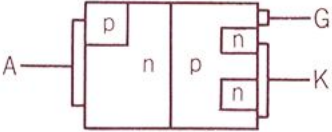
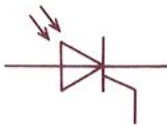
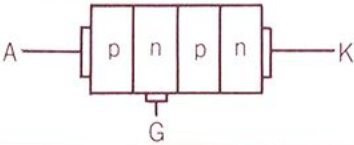
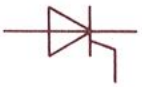
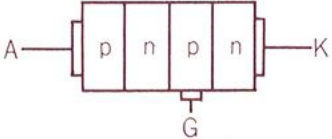
7	実教	工業　179

平成2年1月20日　初版印刷
平成2年1月25日　初版発行

©著作者　宮入　庄太
ほか15名(別記)

●発行者　実教出版株式会社
代表者　奥脇誠治
東京都千代田区五番町5

●印刷者　中央印刷株式会社
代表者　日岐弘登
東京都新宿区新小川町4－24

●発行所　実教出版株式会社
〒102　東京都千代田区五番町5
電話　03-238-7700(代表)
振替　東京　4-183260

●定　価　文部大臣が認可し官報で告示した定価〔消費税に相当する金額を含む〕(上記の定価は、各教科書取次供給所に表示します)

サイリスタの構造と働き

名称と図記号	構　造　と　働　き	
2極逆伝導サイリスタ		
2極双方向サイリスタ	SSSともいう。	❶T_1, T_2間の電圧を大きくしていくと，ブレークオーバ電圧になったところでターンオンする。 ❷T_1, T_2間の電圧がきわめて低くなるとターンオフする。
3極ターンオフサイリスタ (GTO)（nゲート）	アノード側を制御する。	❶ゲート信号がカソード全面に作用して，A，K間に流れる電流を阻止する。 ❷ゲートに高い電圧が加えられるように，チップの構造や電極の形状が工夫されている。 ❸順電流が流れているときの損失が大きい。ゲート感度がよくない。保持電流が大きい。
3極ターンオフサイリスタ (GTO)（pゲート）	カソード側を制御する。	
4極逆阻止サイリスタ		
3極双方向サイリスタ	TRIACともいう	❶全波位相制御回路に用いられる。 ❷白熱電球の調光回路によく利用される。 ❸蛍光灯の調光には向かない。

佐藤恭一

名称と図記号	構造と働き	
3極逆伝導サイリスタ（nゲート）	アノード側を制御する。	❶逆電圧の場合は阻止能力がなく，順方向と同じくA，K間に電流が流れる。
3極逆伝導サイリスタ（pゲート）	カソード側を制御する。	
pnpnダイオード	2極逆阻止サイリスタともいう。	
感光サイリスタ	❶受光窓にある強さの光を当てるとターンオンする。 ❷ゲート回路は感度調整に用いる。	
感熱サイリスタ	❶熱を感じるとターンオンする。 ❷ゲート回路で動作温度を調整する。	
3極pnpnスイッチ	3極逆阻止サイリスタ（nゲート）ともいう。 アノード側を制御する。	❶逆方向には電流が流れない。
3極npnpスイッチ	3極逆阻止サイリスタ（pゲート）ともいう。 カソード側を制御する。	

（JIS C 0301-1982により作成）